

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO POSCOSECHA Y ESTIMACIÓN DEL
TIEMPO DE VIDA ÚTIL DE LA PIMIENTA VERDE (*Piper nigrum* L.) CULTIVADA EN
EL MUNICIPIO DE VILLA GARZÓN DEPARTAMENTO DEL PUTUMAYO**

FERNANDA STEPHANY ENRIQUEZ GÓMEZ

JHOAN SEBASTIÁN TOBAR YELA

UNIVERSIDAD DE NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

SAN JUAN DE PASTO

2018

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO POSCOSECHA Y ESTIMACIÓN DEL
TIEMPO DE VIDA ÚTIL DE LA PIMIENTA VERDE (*Piper nigrum* L.) CULTIVADA EN
EL MUNICIPIO DE VILLA GARZÓN DEPARTAMENTO DEL PUTUMAYO**

FERNANDA STEPHANY ENRIQUEZ GÓMEZ

JHOAN SEBASTIÁN TOBAR YELA

Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero

Agroindustrial

Director

I.A WILLIAM ALEXANDER DIAZ LOPEZ

Presentado a:

COMITÉ CURRICULAR Y DE INVESTIGACIONES

UNIVERSIDAD DE NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

SAN JUAN DE PASTO

2018

NOTA DE RESPONSABILIDAD

“Las ideas y conclusiones aportadas en el siguiente trabajo son responsabilidad exclusiva del autor”.

Artículo 1ro del Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966 emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

NOTA DE ACEPTACIÓN

MSc. Andrés Felipe Cerón Cárdenas

Jurado

MSc. Diego Fernando Mejía España

Jurado

I.A William Alexander Díaz López

Director

San Juan de Pasto, Abril de 2018.

DEDICATORIA

La vida es una gran ecuación, de la que a veces nos gustaría eliminar situaciones o agregar otras en un abrir y cerrar de ojos, pero la matemática nos enseña que todo lleva un proceso, una lógica. Con el tiempo aprendemos a simplificar los factores de la ecuación, y entendemos que varios caminos pueden llevarnos a un mismo resultado. Dedico este esfuerzo a quienes hacen parte día a día de mi ecuación, a quienes han sumado cosas buenas a mi proceso, e incluso a quienes le restaron, porque han ayudado a poner en equilibrio la ecuación.

Fernanda Stephany Enriquez Gomez

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo, y a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron a mi formación.

Jhoan Sebastián Tobar Yela

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

I.A William Alexander Díaz López

Rodrigo Trujillo Andrade

MSc. Andrés Felipe Cerón Cárdenas

MSc. Diego Fernando Mejía España

MSc Laura Inés Latorre Vásquez.

Laboratorio de investigación en conservación y calidad de alimentos universidad de Nariño

RESUMEN

La pimienta es una especie originaria de la India, aunque en la actualidad su producción se encuentra en auge en América Latina. La Empresa Condimentos Putumayo ubicada en el municipio de Villa Garzón, departamento del Putumayo, produce y comercializa pimienta y otras especias a diferentes restaurantes gourmet dentro del país. Actualmente su sistema de producción y comercialización es bueno, pero aún no cuenta con la tecnología requerida para ofrecer productos con características estables durante un tiempo prolongado. Por lo anterior, es difícil comercializar sus productos fuera del país, ya que se trata de un producto mínimamente procesado y perecedero. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el comportamiento poscosecha de la pimienta verde (*Piper nigrum* L.) bajo diferentes condiciones de almacenamiento, y estimar el tiempo de vida útil. Se determinaron algunas propiedades físicas (esfericidad, densidad aparente y peso de mil semillas) y bromatológicas (Humedad, Ceniza, Extracto etéreo, Proteína, Fibra, Hierro y Calcio). Se evaluó el comportamiento poscosecha de la pimienta a tres temperaturas de almacenamiento (4, 18 y 30°C) y cuatro tipos de condiciones de envase (Nitrógeno, polipropileno, vacío y sin envase). Se evaluó firmeza, índice de color, pérdida de peso, humedad e índice de respiración cada dos días hasta que se observaron características de deterioro. Se utilizó un diseño al azar con arreglo factorial 4x3, para comparar el efecto del envase y la temperatura sobre las constantes cinéticas determinadas. Para la evaluación del comportamiento poscosecha (constantes cinéticas de orden cero y uno de las variables firmeza, pérdida de peso, índice de color, y humedad) se realizó un análisis de varianza y una comparación de múltiples medias (Tukey a un 95% de confianza). La estimación de vida útil se realizó mediante la ecuación de Arrhenius.

El análisis de varianza para las constantes cinéticas en Pimienta mostró diferencias significativas ($P < 0.05$) en temperatura de almacenamiento y tipo de empaque, al igual que para sus interacciones en todas las variables evaluadas, siendo nitrógeno a 4°C quien presento los mejores valores de K. Para el caso de la variable firmeza la constante cinética fue $K = 0,189 \text{ días}^{-1}$, para la variable pérdida de peso fue $K = 0,281 \text{ días}^{-1}$, para humedad fue $K = 0,002 \text{ días}^{-1}$, y para índice de color fue $K = 0,221 \text{ días}^{-1}$. La vida útil de la pimienta verde (*Piper nigrum* L.) se determinó por medio de ecuaciones bajo las condiciones de investigación para cada variable respuesta. Los resultados obtenidos indican que la pimienta verde se conserva por 23 días bajo las condiciones: almacenamiento a 4°C y envase con nitrógeno.

ABSTRACT

Pepper is a specie from India, although its production is currently booming in Latin America. The Company “Condimentos Putumayo” settled on Villa Garzón, department of Putumayo, produces and purchase pepper and other spices to different gourmet restaurants in Colombia. Currently its production and marketing system is appropriated, however it still does not have the technology required to offer products whit stable characteristics for a long time. Therefore it is difficult to commercialize their products outside the country, as it is a minimally processed and perishable product. The objective of the present work was to evaluate the postharvest behavior of green pepper (*Piper nigrum* L.) under different storage conditions, and estimate the useful life time. Some physical properties (sphericity, apparent density and weight of a thousand seeds) and bromatological (Moisture, Ash, Ethereal Extract, Protein, Fiber, Iron and Calcium) were determined. The postharvest behavior of the pepper was evaluated at three storage temperatures (4°C, 18°C and 30°C) and four types of packaging conditions (Nitrogen, polypropylene, vacuum, and without packaging). It were evaluated: firmness, color index, weight loss, humidity and respiration index every two days until the deterioration of the characteristics of the pepper was observed. A random design with 4x3 factorial arrangement was used to compare the effect of packaging and temperature on the determined kinetic constants. For the evaluation of post-harvest behavior (zero-order kinetic constants and one of the variables firmness, weight loss, color index, and humidity), it was realized an analysis of variance and a comparison of multiple means (Tukey at 95% confidence). The estimate of shelf life was made with Arrhenius equation.

The analysis of variance for the kinetic constants in pepper showed significant differences ($P < 0.05$) in storage temperature and type of packaging, as well as their interactions in all the variables evaluated, with nitrogen at 4°C presenting the best values of K. For the case of the variable firmness, the kinetic constant was: $K = 0.189 \text{ days}^{-1}$, for the variable weight loss was $K =$

0.281 days⁻¹, for moisture was $K = 0.002$ days⁻¹, and for the index of color was $K = 0,221$ days⁻¹.

The shelf life of green pepper (*Piper nigrum* L.) were determined with the equations under the researching conditions for each response variable. The obtained results pointed out that the green pepper is preserved for 23 days under the conditions: storage at 4°C and nitrogen packaging.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	21
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN EN TÉRMINOS DE NECESIDAD Y PERTINENCIA	23
1.1 Descripción del problema.....	23
1.2 Pregunta de investigación.....	24
2. ESTADO DEL DESARROLLO E INNOVACIÓN	25
2.1 Conceptos generales de la pimienta (<i>Piper nigrum</i> L.).....	25
2.2 Composición	25
2.3 Fundamentos teóricos.....	26
2.3.1 Atmósfera modificada (AM).....	26
2.3.2 Efectos de la modificación de la atmósfera.....	27
2.3.3 Gases utilizados en el envase en atmósfera modificada	27
2.3.3.1 Dióxido de Carbono	27
2.3.3.2 Oxígeno.	28
2.3.3.3 Nitrógeno.	28
2.3.4 Material para el envasado en atmósfera modificada.....	29
2.3.4.1 Polietileno de baja densidad (LDPE).	29
2.3.4.2 Polipropileno.....	30
2.3.5 factores biológicos que influyen en el deterioro de productos hortofrutícolas	30
2.3.5.1. Firmeza.	30
2.3.5.2. Respiración.	31
2.3.5.3. Índice de color.....	31

2.3.5.3 Humedad.....	31
2.3.5.4. Pérdida de peso.	31
2.3.6 Vida útil.....	32
2.3.6.1 Ecuaciones de Vida Útil	32
2.3.6.1.1 Cinética de orden cero	33
2.3.6.1.2. Cinética de primer orden.....	33
2.3.7 Ecuación de Arrhenius	33
2.4 Estado del desarrollo e innovación	34
3. OBJETIVOS	37
3.1 Objetivo general.....	37
3.2 Objetivos específicos.....	37
4. METODOLOGÍA.....	38
4.1 Lugar de investigación	38
4.2 Materia prima y operaciones preliminares	38
4.2.1 Desinfección.....	38
4.2.2 Pesado	39
4.3 Determinación de características físicas.....	40
4.3.1 Esfericidad.....	40
4.3.2 Densidad aparente ρ_b	40
4.3.3 Peso de mil granos de pimienta	41
4.4 determinación de características bromatológicas.....	42
4.5 Índice de respiración	42
4.6 Envasado del material vegetal	43
4.7 Almacenamiento de las muestras.....	45

4.8	Diseño experimental.....	47
4.9	Modelo estadístico	47
4.10	Variables de respuesta evaluadas	48
4.10.1	Firmeza.....	48
4.10.2	Índice de color	49
4.10.3	Pérdida de peso	50
4.10.4	Humedad (%).....	50
4.11	Determinación de la vida útil.....	51
4.12	Análisis de la información	53
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	54
5.1	Determinación de características físicas.....	54
5.2	Determinación de características bromatológicas.....	55
5.3	Comportamiento de las propiedades fisicoquímicas y cinéticas de deterioro de la pimienta verde (<i>Piper nigrum</i> L.) durante el almacenamiento.	56
5.3.1	Índice de respiración.	56
5.3.2	Firmeza.....	59
5.3.3	Pérdida de peso	62
5.3.4	Humedad (%)	66
5.3.5	Índice de color	69
6.	ESTIMACIÓN DE VIDA ÚTIL.....	75
6.1	Tiempos de vida útil.....	79
7.	CONCLUSIONES.....	85
8.	RECOMENDACIONES.....	86

REFERENCIAS	87
ANEXOS	96

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición química de la pimienta.	26
Tabla 2. Gases utilizados en el envasado de atmosferas modificadas	29
Tabla 3. Características físicas de la pimienta verde.	54
Tabla 4. Análisis bromatológico pimienta verde.	55
Tabla 5. Análisis de varianza para firmeza en pimienta verde (Piper nigrum L.) bajo diferentes condiciones de almacenamiento.	59
Tabla 6. Mínimos cuadrados de constantes cinéticas de firmeza en Pimienta verde (Piper nigrum L.) bajo diferentes condiciones de almacenamiento.	60
Tabla 7. Análisis de varianza para pérdida de peso en pimienta verde (Piper nigrum L.) bajo diferentes condiciones de almacenamiento.	63
Tabla 8. Mínimos cuadrados de constantes cinéticas de pérdida de peso en Pimienta verde (Piper nigrum L.) bajo diferentes condiciones de almacenamiento.	64
Tabla 9. Análisis de varianza para humedad en pimienta verde (Piper nigrum L.) bajo diferentes condiciones de almacenamiento.	66
Tabla 10. Mínimos cuadrados de constantes cinéticas de humedad en Pimienta verde (Piper nigrum L.) bajo diferentes condiciones de almacenamiento.	67
Tabla 11. Análisis de varianza para índice de color en pimienta verde (Piper nigrum L.) bajo diferentes condiciones de almacenamiento.	70
Tabla 12. Mínimos cuadrados de constantes cinéticas de índice de color en Pimienta verde (Piper nigrum L.) bajo diferentes condiciones de almacenamiento.	71
Tabla 13. Promedios de parámetros cinéticos y bondad de ajuste ecuación de Arrhenius para cambios de firmeza en pimienta (Piper nigrum L.).	76

Tabla 14. Promedios de parámetros cinéticos y bondad de ajuste ecuación de Arrhenius para pérdida de peso en pimienta (<i>Piper nigrum</i> L.).....	77
Tabla 15. Promedios de parámetros cinéticos y bondad de ajuste ecuación de Arrhenius para cambios de humedad en pimienta (<i>Piper nigrum</i> L.).....	77
Tabla 16. Promedios de parámetros cinéticos y bondad de ajuste ecuación de Arrhenius para cambios de índice de color en pimienta (<i>Piper nigrum</i> L.).....	78
Tabla 17. Consolidado de ecuaciones de Arrhenius para las variables evaluadas.	79
Tabla 18. Constantes cinéticas (K) a diferentes temperaturas para las variables evaluadas.	80
Tabla 19. Consolidación de parámetros cinéticos de las variables evaluadas en N ₂	81
Tabla 20. Días estimados de vida útil a diferentes temperaturas de almacenamiento.....	81
Tabla 21. Consolidación de parámetros cinéticos de índice de color en cada envase	83
Tabla 22. Estimación de vida útil para el parámetro índice de color en cada envase.....	83

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Variación de un índice de calidad en función del tiempo de acuerdo con la cinética de orden cero, primero y segundo.....	32
Figura 2. Cinética de respiración Pimienta verde.	57
Figura 3. Cinética de firmeza en Pimienta verde (<i>Piper nigrum</i> L.).	61
Figura 4. Cinética de pérdida de peso en Pimienta verde (<i>Piper nigrum</i> L.).	64
Figura 5. Cinética de Humedad en Pimienta verde (<i>Piper nigrum</i> L.).	68
Figura 6. Cinética de color en Pimienta verde (<i>Piper nigrum</i> L.).	71
Figura 7. Ecuación de Arrhenius para cambios de firmeza, pérdida de peso, porcentaje de humedad e índice de color en pimienta verde (<i>Piper nigrum</i> L.)	75

LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 1. Materia prima.....	38
Imagen 2. Desinfección.	39
Imagen 3. Pesaje.....	39
Imagen 4. Determinación de esfericidad.	40
Imagen 5. Determinación densidad aparente.	41
Imagen 6. Peso de mil granos de pimienta.	42
Imagen 7. Determinación de Respiración en pimienta.....	43
Imagen 8. Envasado vacío.	44
Imagen 9. Envasado polipropileno.....	44
Imagen 10. Envasado AM.....	45
Imagen 11. Envasado polipropileno termoresistente.....	45
Imagen 12. Almacenamiento en Nevera lab 506.	46
Imagen 13. Almacenamiento al ambiente.....	46
Imagen 14. Almacenamiento en Incubadora lab 506.	47
Imagen 15. Determinación de firmeza en pimienta.	48
Imagen 16. Determinación de color en pimienta.	49
Imagen 17. Pérdida de peso en pimienta.	50
Imagen 18. Determinación de humedad en pimienta.	51
Imagen 19. Pimienta a vacío (18°C) día 1.	58
Imagen 20. Pimienta a vacío (18°C) día 14.	59
Imagen 21. Pimienta envase a vacío (18°C) 12 días.....	73
Imagen 22. Pimienta sin envase (18°C) 14 días.	74

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Valores Esfericidad.....	97
Anexo 2. Valores resultantes de esfericidad.....	97
Anexo 3. Valores Densidad aparente.....	97
Anexo 4. Valores resultantes Densidad aparente.....	98
Anexo 5. Valores Peso de mil granos de pimienta.....	98
Anexo 6. Valores resultantes peso de mil granos de pimienta posterior a extrapolación.....	98
Anexo 7. Análisis de varianza para firmeza en Pimienta verde (<i>Piper nigrum</i> L.).....	99
Anexo 8. Parámetros cinéticos y bondad de ajuste cinética de orden cero para Firmeza en pimienta verde (<i>Piper nigrum</i> L.).....	100
Anexo 9. Análisis de varianza pérdida de peso en Pimienta verde (<i>Piper nigrum</i> L.).....	101
Anexo 10. Parámetros cinéticos y bondad de ajuste cinética de orden cero para pérdida de peso en pimienta verde (<i>Piper nigrum</i> L.).....	102
Anexo 11. Análisis de varianza Humedad en Pimienta verde (<i>Piper nigrum</i> L.).....	103
Anexo 12. Parámetros cinéticos y bondad de ajuste cinética de orden uno para Humedad en pimienta verde (<i>Piper nigrum</i> L.).....	104
Anexo 13. Análisis de varianza Color en Pimienta verde (<i>Piper nigrum</i> L.).....	105
Anexo 14. Parámetros cinéticos y bondad de ajuste cinética de orden cero para Color en pimienta verde (<i>Piper nigrum</i> L.).....	106
Anexo 15. Análisis características bromatológicas de pimienta verde (<i>Piper nigrum</i>)	107

INTRODUCCIÓN

La pimienta es una de las especias más usadas alrededor del mundo, estudios realizados por Carretero (2009), afirman que esta no solo mejora las cualidades organolépticas de los alimentos, sino que además, está dotada de propiedades terapéuticas interesantes que pueden ser beneficiosas para la salud. Esta especie es originaria de la india, aunque en la actualidad su producción se encuentra en auge en américa latina. La Empresa Condimentos Putumayo ubicada en el municipio de Villa Garzón, se dedica a producir y comercializar pimienta y otras especias a diferentes restaurantes gourmet dentro del país, actualmente su sistema de producción y comercialización es bueno, pero lastimosamente no cuenta con la tecnología necesaria para ofrecer productos que mantengan sus características durante un tiempo prolongado y por ende es difícil comercializar sus productos fuera del país, ya que se trata de un producto mínimamente procesado y perecedero. Estudios realizados por Ospina & Cartagena (2008) demuestran que existen técnicas que permiten preservar las características de los productos por más tiempo almacenándolos bien sea a bajas temperaturas o haciendo uso de envases con atmosferas modificadas. Estas técnicas son adecuadas para prolongar la vida útil de las frutas y hortalizas después de la cosecha, ya que retarda la maduración y el deterioro al reducir la velocidad de los procesos metabólicos.

El objetivo de la investigación fue evaluar el comportamiento poscosecha de la pimienta verde (*piper nigrum* L.) en diferentes condiciones de almacenamiento (4°C, 18°C y 30°C) y tipos de envase (Nitrógeno, polipropileno, vacío y sin envase), que permitan mantener las características de la pimienta en estado fresco, y estimar el tiempo de vida útil bajo estas condiciones. Para este propósito se determinaron algunas propiedades físicas (esfericidad, densidad aparente y peso de mil semillas) y bromatológicas (Humedad, Ceniza, Extracto etéreo, Proteína, Fibra, Hierro y Calcio). Se utilizó un diseño al azar con arreglo factorial 4x3, para comparar el efecto del

empaque y la temperatura sobre las constantes cinéticas determinadas. Los resultados esperados en esta investigación fueron la caracterización fisicoquímica de algunos atributos de la pimienta verde (*Piper nigrum* L.), la cinética de deterioro, la determinación del efecto del almacenamiento en diferentes tipos de empaque y temperatura, además del modelo matemático que permitirá estimar la vida útil de la misma.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN EN TÉRMINOS DE NECESIDAD Y PERTINENCIA

1.1 Descripción del problema

Según Córdova (2012) la pimienta es una de las especias más importantes cuyo valor comercial mundial alcanza los 509 millones de dólares con muchos países que la importan y muy pocos productores. Actualmente se constituye como una especia con alta demanda y alto valor comercial a nivel mundial, siendo una de las mejores alternativas para la sustitución de cultivos ilícitos en el departamento del Putumayo. Aunque no es un cultivo fácil, se adapta muy bien a las condiciones del departamento en mención, los buenos resultados en producción y la integración de mano obra familiar, hacen que este cultivo sea visto con mucho agrado por las instituciones y por los agricultores (ICA, 2014). La pimienta es originaria de los bosques húmedos tropicales de la india. Se adapta en altitudes de hasta los 1000 msnm, obteniéndose los mejores resultados en altitudes inferiores a los 600 msnm, es decir que a menor altitud mejor su desarrollo (ASOPROP, 2001). Este cultivo es muy factible en regiones donde las tierras poseen una alta calidad en nutrientes, por ello los países centroamericanos y del Sur en donde atraviesa la cordillera de los andes y sierras variadas, son aptas para el cultivo de la pimienta y sus especies derivadas. El municipio de Villa Garzón (Putumayo) cuenta con una temperatura, humedad relativa y suelos con componentes que propician un ambiente adecuado para el cultivo de la pimienta. La pimienta no hace parte de la cocina tradicional de los putumayenses, pero, aun cuando no es un sazónador de la gastronomía de esta zona del departamento, su cultivo se ha convertido en un apoyo para la generación de empleos, y en una alternativa de muchos de los campesinos de esta región, que en su mayoría dedicaban sus esfuerzos en mantener cultivos ilícitos. Gracias al apoyo de varias entidades, muchas familias lograron reemplazar estos cultivos por cultivos como el de la pimienta, mejorando así su calidad de vida. Debido a los altos índices de producción de la

pimienta actualmente, es necesario realizar una investigación encaminada a la conservación de sus características, para que de esta manera se tenga la oportunidad de ampliar el mercado actual e incursionar en otro tipo de mercados.

Lo productores de pimienta afirman que esta presenta características poscosecha poco favorables tales como cambios de color, desarrollo de aromas indeseables, pérdida de peso, lixiviados, entre otras, que posiblemente se deban a la degradación de las características fisicoquímicas del material vegetal y el insuficiente componente tecnológico, que no permiten un control de las variables que garanticen la conservación del producto lo que es preocupante porque limita su producción y distribución. Lastimosamente en la actualidad no existen las suficientes investigaciones que evalúen el comportamiento poscosecha de la pimienta, por lo tanto es importante buscar alternativas para dar solución a esta problemática.

En este contexto se planteó la siguiente pregunta de investigación:

1.2 Pregunta de investigación

¿Cuál es el tiempo de vida útil de la pimienta verde (*Piper nigrum* L.) almacenada en diferentes condiciones?

2. ESTADO DEL DESARROLLO E INNOVACIÓN

2.1 Conceptos generales de la pimienta (*Piper nigrum* L.)

La pimienta es una de las especias más usadas como condimento en la preparación de carnes y como preservante en la preparación de embutidos. Su aceite esencial y oleoresina se emplean en la industria de alimentos, perfumería y medicina. El rendimiento esperado varía con la edad de la planta y por otros factores; para la pimienta verde, en el primer año de producción el rendimiento esperado es de 2,6 Ton/ha, en el segundo año 5,2 Ton/ha, en el tercer año 10,3 Ton/ha, y el cuarto año 12,9 Ton/ha. Después el rendimiento se estabiliza. El rendimiento en pimienta seca corresponde aproximadamente a una cuarta parte de la producción de pimienta verde. Un aspecto importante de la planta de la pimienta es que en la mayoría de casos el rango de pH a la que puede adaptarse es muy variado. (Cano, Chávez, Godínez, Monzón, 2002)

2.2 Composición

La planta contiene alrededor de 3% de aceite esencial, cuyo aroma es dominado (80% máximo) por los monoterpenos; sabineno y alfa-pineno, además contiene los terpenos, betapineno, mirceno, limoneno, delta-3-careno y los derivados de los monoterpenos borneol, carvona, carvacrol, 1,8-cineol, linalol. Los sesquiterpenos representan 20% del aceite esencial: beta-cariofileno, humeleno, beta-bisabolone, y óxidos y cetonas derivadas del cariofileno. También contiene trazas de eugenol, miristiceno, safrol. (Cano, Chávez, Godínez, Monzón, 2002)

Tabla 1.**Composición química de la pimienta.**

Componente	Máxima (%)	Mínima (%)
Humedad	15.6	9.56
Proteínas	12.66	10.80
Aceites Esenciales	2	1
Almidón e hidratos de carbono	50	32.1
Celulosa	15.5	11.9
Cenizas	5.9	3.4
Extractos de alcohol seco	13.3	6.5
Resinas	1.58	1.16

Fuente: (Cano, Chávez, Godínez, Monzón, 2002)

2.3 Fundamentos teóricos

2.3.1 Atmósfera modificada (AM)

Según Ospina y Cartagena, (2008), después de ser cosechadas, las frutas y vegetales frescos continúan sus procesos metabólicos, consumen O₂ y producen Dióxido de Carbono y vapor de agua. La modificación de la atmósfera alrededor del producto se lleva pasivamente por efecto de la respiración y permeabilidad de la película. Cuando el producto fresco es envasado, se llevan a cabo dos procesos simultáneos: la respiración del producto y la permeación de los gases a través de la película plástica, por otro lado se encuentra al envasado activo que se refiere a la incorporación de ciertos aditivos en la matriz del envase o dentro del envase para modificar la atmósfera dentro del envase y prolongar la vida de anaquel del producto. Bajo esta definición, el envasado activo puede utilizar: absorbedores de O₂, absorbedores-liberadores de CO₂, liberadores de etano y absorbedores de etileno. Esta tecnología es relativamente nueva, sin embargo los

costos son más altos que la AM normal. Se debe tener en cuenta que el aire y el O₂ ejercen efectos destructores sobre las vitaminas (particularmente la vitamina A y C) sobre los colores, los sabores y otros componentes de los alimentos.

2.3.2 Efectos de la modificación de la atmósfera

Entre los beneficios de la AM se encuentran que frenan la actividad respiratoria, reducen o inhiben la síntesis de etileno, inhiben la maduración, limitan el ablandamiento (actividad de la pectinestearasa y la poligalacturonasa), retrasan las pérdidas de textura, restringen los cambios de composición (pérdida de acidez y de azúcares, degradación de clorofila, desarrollo de antocianos, biosíntesis de carotenos, prevención de la rancidez y el pardeamiento enzimático paliando las alteraciones fisiológicas y los daños por frío, manteniendo el color y protegiendo las vitaminas de los productos frescos), prolonga la utilidad y conserva la calidad de frutas y hortalizas, no deja residuos en el producto tratado, se minimiza el uso de aditivos y conservantes y se mantienen las características organolépticas durante la comercialización. (Ospina, Cartagena, 2008)

2.3.3 Gases utilizados en el envase en atmósfera modificada

2.3.3.1 Dióxido de Carbono

Es un gas no combustible, incoloro a temperatura ambiente y presión normal, con olor y sabor ácidos, soluble en agua a temperatura ambiente. Se encuentra en la atmósfera en una concentración entre 300-500 ppm, más denso que el aire y más soluble en diluciones acuosas que el N₂ o el O₂. El efecto del CO₂ se fundamenta en que desplaza el O₂ gas vital para muchos microorganismos y cambia las condiciones de pH en la superficie del alimento. Actúa principalmente frente a los microorganismos oxigénicos obligados. (Ospina, Cartagena, 2008)

2.3.3.2 Oxígeno.

Concentraciones de O₂ inferiores a la normal existentes en el aire ambiente (21%) provocan una reducción de la intensidad respiratoria (IR), un retraso en la maduración y un aumento de la vida comercial de los productos vegetales, siendo la respuesta más o menos pronunciada según el producto y variedad de que se trate. Concentraciones superiores a la normal del aire, pueden o no, elevar la intensidad respiratoria y acelerar la maduración. Concentraciones de O₂ inferiores al 2,5% aumentan la producción de anhídrido carbónico y generan sabores y olores anormales como consecuencia del establecimiento del proceso fermentativo por falta de O₂. A bajas temperaturas, el efecto de un nivel bajo de O₂, es menos marcado que a temperaturas altas. (Ospina, Cartagena, 2008)

2.3.3.3 Nitrógeno.

Es el principal componente del aire, en una proporción del 78% en volumen. En condiciones normales (20°C y 1 atm) se encuentra en fase gaseosa, siendo incoloro, inodoro e insípido. El N₂ es un gas totalmente inerte y muy poco soluble en agua y grasas lo que le convierte en un producto ideal para la conservación de alimentos y bebidas. Por sus características fisicoquímicas el N₂ es utilizado en el empaque en AM para reemplazar el O₂ del interior del envase y evitar problemas oxidativos en productos de alto contenido de grasa; otra de sus funciones es actuar como gas de relleno evitando el “colapso de envase” cuando se utilizan altas concentraciones de CO₂. Es efectivo contra los microorganismos pero es inoperante contra las bacterias anoxigénicas. Para garantizar que dichas bacterias no se desarrollen en el empaque se utiliza una pequeña cantidad de O₂. (Ospina, Cartagena, 2008)

Tabla 2.***Gases utilizados en el envasado de atmosferas modificadas***

	N ₂	CO ₂	O ₂
Propiedades físicas	Inerte, insípido, insoluble	Inerte, inodoro, ligero sabor ácido, soluble en agua y grasa	Insípido e incoloro
Ventajas	Desplazamiento de O ₂ . Inhibición de aerobios, evita la oxidación de las grasas.	Bacteriostático, fungistático, insecticida.	Sostiene metabolismos vegetales
Desventajas	-	Solubilidad agua y grasa	Oxidación

Fuente: (Ospina, Cartagena, 2008)

2.3.4 Material para el envasado en atmósfera modificada

2.3.4.1 Polietileno de baja densidad (LDPE).

Presenta una inercia química relativa y su permeabilidad es moderadamente baja al vapor de agua, pero alta para el O₂. En general, la permeabilidad a los gases es alta, y también presenta un reducido efecto barrera frente a olores; los aceites esenciales pasan rápidamente a través de los polietilenos de baja densidad. Relacionado con el LDPE está el etileno-acetato de vinilo (EVA), un copolímero de etileno y acetato de vinilo. El copolímero tiene mejores cualidades de soldadura; es decir, un umbral de temperatura de soldadura menor permite hacer el sellado a

través de un cierto nivel de contaminación, como trazas de agua, condensación o grasa de los productos que se está envasando. (Aular, et al., 2001)

2.3.4.2 Polipropileno.

Es químicamente similar al polietileno y puede ser extruido o coextruido con un elemento monómero para proporcionar características de sellado por calor. El polipropileno de tipo orientado, aunque tiene mayores rangos de barrera frente al vapor de agua que el polietileno, también proporciona una mayor barrera a los gases -siete a diez veces-, teniendo además una excelente resistencia a las grasas. (Izquierdo, Naranjo, 2006)

Según Iglesias, Cabezas y Nuevo, (2006) el PVC posee una buena capacidad barrera frente a los gases y moderada al vapor de agua. Posee una excelente resistencia a grasas y aceites, y en su forma no plastificada, UPVC, es posible pulir, incluso formando bandejas planas o profundas, por otro lado los autores también plantean que el empaque Poliamida (Nylon) es una película que absorbe muy bien el agua, es rígida y muy resistente a la tracción, a la perforación, a altas temperaturas, a los aceites y a las grasas. Es muy poco impermeables al vapor de agua y débil a la fricción. Presentan buena barrera al oxígeno. Se emplean como película junto al polietileno.

2.3.5 factores biológicos que influyen en el deterioro de productos hortofrutícolas

2.3.5.1. Firmeza.

Se define la firmeza de un material, como la fuerza necesaria para romper los tejidos carnosos y está relacionada con los diferentes estados durante el proceso de maduración, por lo tanto la firmeza de la fruta es considerada como un buen indicativo de la madurez. La firmeza depende del estado de la fruta en el momento de recolección, de la temperatura y forma de almacenamiento y puede relacionarse con el color externo. (Ospina, Ciro y Aristizábal, 2007).

2.3.5.2. Respiración.

Proceso metabólico desarrollado en las células de los organismos vegetales por el cual los materiales orgánicos (carbohidratos, proteínas y grasas, entre otros) se transforman en productos más simples como agua y dióxido de carbono con liberación de energía. (Calero, 2012)

2.3.5.3. Índice de color.

El Índice de Color describe la coloración de la epidermis de la fruta, permitiendo seguir la evolución de la maduración y para ello se toman tres parámetros L^* , a^* , b^* , siguiendo el estándar de iluminación de la escala espectral, donde L^* describe la luminosidad y a^* , b^* , evalúan la saturación que nos da la pureza del color y el tono es el color propiamente. (García et al., 2011)

2.3.5.3 Humedad.

Es el agua contenida por atracción molecular a sustancias adsorbentes y es retenida por débiles fuerzas de acción capilar en espacios extracelulares. Ejerce una presión de vapor igual a la del agua pura a igual temperatura. Es el líquido que se encuentra en exceso con respecto a la humedad de equilibrio y puede retirarse con procesos como secado (Kader y Pelayo, 2011).

2.3.5.4. Pérdida de peso.

Las frutas y hortalizas frescas se componen principalmente de agua (80% o más) y en la etapa de crecimiento tienen un abastecimiento abundante de agua a través del sistema radicular de la planta. Con la cosecha, este abastecimiento de agua se corta y el producto debe sobrevivir de sus propias reservas. Al mismo tiempo que ocurre la respiración, el producto cosechado continúa perdiendo agua hacia la atmósfera, tal como lo hacía antes de la cosecha, por un proceso conocido como transpiración (Flores y Ruiz, 2010).

2.3.6 Vida útil

Se puede definir como el período de tiempo que corresponde en determinadas circunstancias (envasado, transporte, condiciones de almacenamiento, clima) una disminución tolerable en la calidad de un producto envasado. El adjetivo "tolerable", en particular, se debe enfatizar, desde la decadencia cualitativa en el tiempo de un producto alimenticio envasado. El entorno en el que cualquier producto es envasado durante su comercialización es un sistema tan complejo y diverso que inevitablemente determina la interacción con el producto, que influyen en la calidad inherente y original (Piergiovanni & Limbo, 2010). La Vida útil sensorial se determina como el tiempo requerido en que las puntuaciones globales de agrado del producto estén por debajo de un valor predeterminado (Giménez y Ares, 2012).

2.3.6.1 Ecuaciones de Vida Útil

La vida útil de un producto se puede representar a través de ecuaciones que muestran la cinética de degradación de atributos de calidad. En la figura 1 se define el comportamiento para cada orden de reacción.

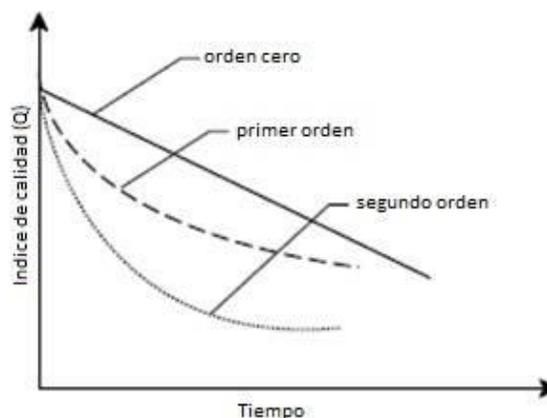


Figura 1. Variación de un índice de calidad en función del tiempo de acuerdo con la cinética de orden cero, primero y segundo.

Fuente: (Piergiovanni y Limbo, 2010)

2.3.6.1.1 Cinética de orden cero

En esta cinética se considera que la variación de la propiedad considerada es independiente de la concentración de los reactivos, por lo que en la expresión potencial se considera $n = 0$ (Garza, 2002). La cinética de orden cero se describe en la ecuación 1.

$$Q = Q_0 \pm Kt \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde Q es el valor de la propiedad considerada para un tiempo cualquiera, Q_0 es el valor inicial de la propiedad, t es el tiempo, k la constante cinética de orden cero. Representa una línea recta.

2.3.6.1.2. Cinética de primer orden

Si el exponente n es igual a 1, la variación del Índice depende tanto el tiempo y el valor de Q . La variación de Q con respecto a t (velocidad del fenómeno de descomposición) asume diferentes valores (Piergiovanni y Limbo, 2010). Esta cinética se muestra en la ecuación 2.

$$\ln Q = \ln Q_0 \pm K't \quad (\text{Ec. 2})$$

De este modo, la variación de la propiedad ($\ln Q/Q_0$) con respecto al tiempo viene representada por una recta cuya pendiente viene dada por la constante cinética de primer orden, k_1 . A medida que k_1 aumenta las rectas son más pronunciadas (Garza, 2002).

2.3.7 Ecuación de Arrhenius

Es una expresión matemática que se utiliza para comprobar la dependencia de la constante cinética respecto a la temperatura y a la energía de activación, de acuerdo con la expresión:

$$\ln K = \ln A - \frac{E_a}{R} * \frac{1}{T} \quad (\text{Ec. 3})$$

Dónde:

K = constante cinética (dependiente de la temperatura)

A = factor pre exponencial o factor de frecuencia

Ea = energía de activación, expresada en KJ mol⁻¹,

R = constante universal de los gases (0,00831 KJ/mol K)

T = temperatura en Kelvin

2.4 Estado del desarrollo e innovación

Se han realizado algunas investigaciones referentes a la pimienta verde (*Piper nigrum* L.) tal como reportan los siguientes autores:

En la investigación realizada por Prasad et al., (2001) encontraron que el ennegrecimiento de las bayas de pimienta verde (*Piper nigrum* L.) se debía a una reacción de oxidación que se catalizaba por enzimas del glicósido de 3,4-dihidroxi-feniletanol y por una o-difenol oxidasa presente en el fruto.

Nisha, Rekha, y Aniruddha (2009) en su estudio denominado La cinética de degradación del sabor de la pimienta negra (*Piper nigrum* L.), encontraron que la pérdida de sabor evaluada en términos de contenido de piperina y oleorresina (compuestos encontrados en cantidades considerables en la pimienta) responden a la cinética de primer orden.

Fenglin et al., (2013) investigaron la actividad de polifenol oxidasa (PPO) en un proceso de secado al sol al que se sometieron las bayas de la pimienta verde, para el proceso utilizaron diferentes temperaturas de exposición, una de 100°C por 10 segundos y otras de 80 y 90°C por un tiempo más prolongado. Los investigadores llegaron a la conclusión de que el ennegrecimiento de las bayas de la pimienta verde no depende únicamente de la actividad de la polifenol oxidasa.

Celale et al., (2014) realizaron una investigación combinando envasado en atmosferas modificadas (aire y N₂) con irradiaciones gamma (7 kGy, 12 kGy, 17 kGy) en pimienta negra (*Piper nigrum* L.), romero (*Rosmarinus officinalis* L.) y comino (*Cuminum cyminum* L.). De la cual se concluye que la decoloración en pimienta negra y en romero fue menor para los que se envasaron en N₂ que en los que fueron envasados con aire, además. La irradiación gamma disminuyó los monoterpenos y aumentó los compuestos oxigenados, pero el efecto fue menor en la las muestras envasadas con N₂. Los autores determinaron que en general, las este tipo de especias deben irradiarse bajo una atmósfera libre de O₂ para minimizar el deterioro de la calidad.

Por otro lado se han realizado algunas investigaciones en cuanto al envase en atmosferas modificadas para prolongar la vida útil en otros materiales vegetales, tal y como reportan los siguientes autores:

Corbo et al., (2010) considera que el envasado con atmosferas modificadas es una de las técnicas más importantes que se utilizan para prolongar su vida útil en productos hortofrutícolas recién cortados, incluso sin la utilización de otros procesos alternativos (UV, escaldado, radiación infrarroja, radiación y altas presiones). Aunque por otra parte Kader et al., (1989) mantienen que el envasado en atmósfera modificada de frutas y verduras combinadas con almacenamiento en frío mínimamente procesados son considerados como la mejor manera para mantener la calidad sensorial y microbiológica.

Arévalo Y Castrillón (2004) evaluaron el almacenamiento de café tostado y molido en atmosfera de nitrógeno y gas carbónico como método de conservación del café y el efecto que tiene la técnica de empaque (60% nitrógeno +40 % Gas carbónico). Como resultado de este estudio se obtiene que las atmosferas modificadas mantienen la calidad del café durante el almacenamiento.

Espinosa, Valle, Ybarra y Martínez (2014) encontraron que con un sistema de AM micro perforada fue posible controlar la concentración de gases en los envases de atmósfera modificada (AM) de forma que con 4 orificios a 18 °C y 2 orificios a 5 °C se logró tener 3.5 y 4.0 % de concentración de O₂, y 23.2 y 16.6 % de CO₂, respectivamente. El uso de refrigeración permitió reducir los cambios de peso, firmeza y color de productos hortofrutícolas, características que constituyen referentes importantes de la calidad de los mismos.

De igual forma Nasar et al., (2008) investigaron el comportamiento del nitrógeno y oxígeno frente al retardo o aceleración del oscurecimiento del color de haba (*Vicia faba* L.) durante el almacenamiento, encontraron que el nitrógeno es eficaz para reducir el oscurecimiento del color por un nivel apreciable, mientras que el almacenamiento en oxígeno acelera el proceso de oscurecimiento del color.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Evaluar el comportamiento poscosecha bajo diferentes condiciones de almacenamiento de la pimienta verde (*Piper nigrum* L.) cultivada en el departamento del Putumayo

3.2 Objetivos específicos

- Determinar algunas características físicas y bromatológicas de la pimienta verde (*Piper nigrum* L.).
- Realizar y evaluar la cinética de deterioro de la pimienta verde (*Piper nigrum* L.) bajo almacenamiento refrigerado, ambiente y temperatura de incubación en diferentes tipos de empaques.
- Estimar el tiempo de vida útil para la pimienta verde (*Piper nigrum* L.) bajo el modelo de Arrhenius.

4. METODOLOGÍA

4.1 Lugar de investigación

El acondicionamiento de la pimienta (*Piper nigrum* L.) se llevó a cabo en la Planta Piloto de la Facultad de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad de Nariño sede Torobajo Pasto (Nariño).

4.2 Materia prima y operaciones preliminares

La pimienta verde (*Piper nigrum* L.) utilizada en esta investigación fue suministrada por la empresa Condimentos Putumayo, procedente del municipio de Villa Garzón (Departamento del Putumayo).



Imagen 1. Materia prima.

Fuente: esta investigación

4.2.1 Desinfección

La pimienta se sumergió en una solución de agua con hipoclorito de sodio al 5.25% a una concentración de 50 ppm, para minimizar la carga microbiana. Posteriormente se colocó en bandejas para eliminar el exceso de agua.



Imagen 2. Desinfección.

Fuente: esta investigación

4.2.2 Pesado

Una vez seleccionados los granos, se pesaron aproximadamente 100 g de pimienta verde (*Piper nigrum* L.) para su posterior empaque según el tratamiento a emplear, con una balanza de precisión marca DUNE DCT5000



Imagen 3. Pesaje.

Fuente: esta investigación

4.3 Determinación de características físicas

4.3.1 Esfericidad

Para determinar la esfericidad de la pimienta, se tomaron 100 granos de pimienta y se midieron sus dimensiones; largo (L), ancho (W) y espesor (T) (Yağın, Özarıslan y Akbas 2007) para ello se utilizó un calibrador pie de rey y la ecuación 4:

$$\phi = \frac{(LWT)^{1/3}}{L} \quad (\text{Ec. 4})$$



Imagen 4. Determinación de esfericidad.

Fuente: esta investigación

4.3.2 Densidad aparente ρ_b

Se determinó mediante el procedimiento de prueba de peso estándar, utilizando una probeta de 250 mL, en la cual se dejó caer a velocidad constante pimientas, este proceso se realizó hasta alcanzar la línea que representa los 200 mL. La masa de las pimientas contenidas en el recipiente fueron previamente pesadas en la balanza DUNE DCT5000, se dividió por el volumen del cilindro representado por la probeta. La densidad aparente de los granos de pimienta se calculó mediante la ecuación 5 (Singh y Goswami, 2000).

$$\rho_b = \frac{M_{rl} - M_{rv}}{V_r} \quad (\text{Ec. 5})$$

Dónde: M_{rl} = Masa del recipiente lleno; M_{rv} = Masa del recipiente vacío; V_r = Volumen del recipiente

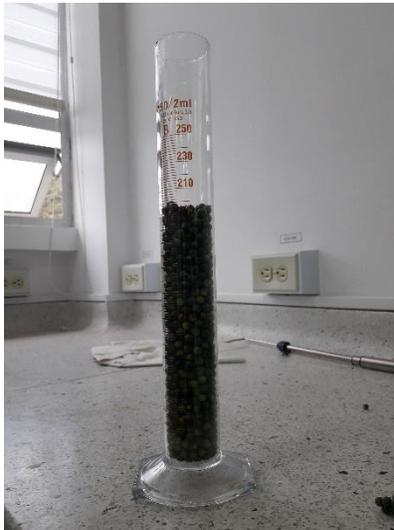


Imagen 5. Determinación densidad aparente.

Fuente: esta investigación

4.3.3 Peso de mil granos de pimienta

Se determinó por medio de una balanza de precisión marca DUNE DCT5000 pesando 100 granos de pimienta y extrapolando el resultado a 1000 granos (Ordoñez *et al.*, 2012).



Imagen 6. Peso de mil granos de pimienta.

Fuente: esta investigación

4.4 determinación de características bromatológicas

La caracterización del material fresco se realizó mediante métodos descritos para el análisis químico de alimentos del laboratorio de bromatología de la Universidad de Nariño, basado en las técnicas de la AOAC (1997) y el método de análisis de alimentos propuesto por Bernal (1998). Se determinaron: Humedad, Ceniza, Extracto etéreo, Proteína, Fibra, Hierro y Calcio.

4.5 Índice de respiración

Se utilizó la metodología de Valenzuela et al., (2011) a través del sensor automático Lutron (GC-2028 CO₂), (Ecuación 7) donde V_g = volumen del gas (se obtuvo por la diferencia entre el volumen total del recipiente menos el volumen de la Pimienta y el sensor); W=Peso; t=Tiempo (min), % CO₂ = ((ppm CO₂ t₂ – ppm CO₂ t₁)/10000).

$$\frac{mgCO_2}{Kg.h} = \frac{2((CO_2 \text{ ppm})/10000)(Vg)60}{(w)(t)*0,1} \quad (\text{Ec. 6})$$



Imagen 7. Determinación de Respiración en pimienta.

Fuente: esta investigación

4.6 Envasado del material vegetal

Para los ensayos se pesaron aproximadamente 100g de pimienta verde (*Piper nigrum* L.) que posteriormente fueron envasarlos en distintos tipos de atmosferas: a vacío, con ayuda de la empacadora SAMMIC SV 520SD (imagen 8), polipropileno, con ayuda de una empacadora manual (imagen 9), nitrógeno, igualmente con la empacadora SAMMIC SV 520SD introduciendo N₂ a una presión de 1,5 bar con un porcentaje de inyección del equipo del 70 % de gas para garantizar el sellado a través de la operación de vacío compensado (imagen 10), y finalmente al ambiente, en vasos de polipropileno termoresistente sin tapa, que se utilizaron con el fin de contener la pimienta para las pruebas posteriores, este tratamiento tenía la finalidad de evaluar las características fisicoquímicas de la pimienta sin empaque en las diferentes condiciones de ambiente mencionadas (imagen 11).



Imagen 8. Envasado vacío.

Fuente: esta investigación



Imagen 9. Envasado polipropileno.

Fuente: esta investigación



Imagen 10. Envasado AM.

Fuente: esta investigación



Imagen 11. Envasado polipropileno termoresistente.

Fuente: esta investigación

4.7 Almacenamiento de las muestras

Una vez sellados los envases se colocaron en el sitio de almacenamiento para su posterior seguimiento. Las muestras se almacenaron a 4°C en la nevera (imagen 12), a 18°C en una caja de icopor sin tapa para contener la pimienta envasada (imagen 13) y a 30°C en una caja de icopor modificada para efectos de la investigación (imagen 14).



Imagen 12. Almacenamiento en Nevera lab 506.

Fuente: esta investigación



Imagen 13. Almacenamiento al ambiente.

Fuente: esta investigación



Imagen 14. Almacenamiento en Incubadora lab 506.

Fuente: esta investigación

4.8 Diseño experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial 4x3, los factores son; factor 1: Tipo de envase, en cuatro niveles; nivel 1: Empaque a vacío, nivel 2: Sin empaque, nivel 3: atmósfera modificada (N₂) y nivel 4: Empaque de polipropileno. factor 2: temperatura de almacenamiento en 3 niveles (4 °C, 18 °C y 30 °C), Para un total de 12 experimentos que se llevaran a cabo con 5 réplicas para un total de 60 corridas experimentales, el tamaño de la muestra o la cantidad de pimienta a empacar fue 100 g por cada tratamiento.

4.9 Modelo estadístico

El modelo matemático que representa el diseño estadístico es:

$$Y = \mu + X_1 + X_2 + X_1X_2 + X_2X_1 + e_{1,2}$$

En donde:

Y = Variable de respuesta según efecto de cada factor

μ = Media general del experimento

X = Efecto de cada factor 1 (Condiciones de almacenamiento) y 2 (Temperatura)

e = Error experimental asociado al efecto de cada factor

4.10 Variables de respuesta evaluadas

El seguimiento se realizó hasta que el deterioro de las características de la pimienta no permitía su aprovechamiento, las variables evaluadas fueron:

4.10.1 Firmeza

Para determinar la firmeza se utilizó un texturómetro LLOYD LS1 según la metodología descritas por Zapata et al., (2010), con una punta cilíndrica de 5 mm de diámetro, una carga de 250 Newton (N) y una velocidad de compresión de 21 mm/min, a través del método de punción del grano por penetración. Los datos se capturaron mediante el software NEXYGEN Plus para cada ensayo.



Imagen 15. Determinación de firmeza en pimienta.

Fuente: esta investigación

4.10.2 Índice de color

El índice de color (IC) se determinó en el colorímetro CM5 Konica Minolta, utilizando una medición en lecho, un iluminante D65 y un observador estándar de 10°. El IC se calculó mediante la ecuación 7:

$$IC = \frac{1000 * a}{L * b} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde L , a , y b son los parámetros del sistema color CIELAB. El parámetro L proporciona un valor de la Luminancia o brillo de la muestra. El parámetro a indica la zona de variación entre el rojo y el verde del espectro. El parámetro b se refiere a la zona de variación entre el amarillo y el azul del espectro (García *et al.*, 2011).



Imagen 16. Determinación de color en pimienta.

Fuente: esta investigación

4.10.3 Pérdida de peso

Se determinó según la metodología descrita por Magaña et al. (2004) mediante el pesaje directo con una balanza de precisión marca DUNE DCT5000



Imagen 17. Pérdida de peso en pimienta.

Fuente: esta investigación

4.10.4 Humedad (%)

Se determinó por el método de secado rápido a 200°C (programa N° 2) en una balanza de humedad marca Kern referencia DLB 160, se pesaron aproximadamente 2 g de pimienta verde (*Piper nigrum* L.).



Imagen 18. Determinación de humedad en pimienta.

Fuente: esta investigación

Las constantes cinéticas de velocidad de cambio en los atributos poscosecha a evaluar, se calcularon de acuerdo a modelos de orden cero y primer orden (Ecuación 1 y 2).

$$\text{Orden cero} \quad Q = Q_0 \pm Kt \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\text{Orden uno} \quad \ln Q = \ln Q_0 \pm K't \quad (\text{Ec. 2})$$

En donde Q: valor del atributo al tiempo t; K: constante de velocidad de orden cero; K': constante de velocidad de primer orden.

El orden se escogió según el coeficiente de correlación más alto, obtenido de la linealización de las gráficas K y K', las cuales corresponden a las pendientes de cada gráfica.

4.11 Determinación de la vida útil

Para comprobar la dependencia de las constantes cinéticas la temperatura a la que se lleva a cabo los cambios de los atributos, y para los cálculos del tiempo de vida útil se utilizó la metodología descrita por Baldizón, Valle y Córdoba (2011), mediante la ecuación de Arrhenius (Ecuación 3).

$$\ln K = \ln A - \frac{E_a}{R} * \frac{1}{T} \quad (\text{Ec. 3})$$

En donde K = constante cinética (dependiente de la temperatura) A= factor pre exponencial; Ea = energía de activación de la reacción; R = constante ideal de los gases (0,00831 KJ/mol K); T = temperatura en Kelvin.

En esta ecuación se debe tener en cuenta; a) La energía de activación (Ea) que está relacionada con la barrera de energía que deben superar los reactivos para transformarse en productos, por lo que un valor elevado de la misma provoca un valor reducido de K. b) El factor pre exponencial o factor de frecuencia (A) tiene las mismas unidades que K (Atarés, 2009).

Inicialmente se realizó la gráfica de LnK vs 1/T expresada en grados Kelvin para cada atributo, se calculó la bondad de ajuste y la energía de activación, de lo anterior se tomaron las ecuaciones con los mejores R² (por cada atributo) para reemplazar en estas el valor de las temperaturas propuestas (4°C, 10°C y 24°C) en grados kelvin y se encontraron nuevos valores de K, se determinó el valor de Q de cada una de las variables de respuesta, calculando el valor mínimo promedio obtenido en la experimentación. Finalmente se escogieron las ecuaciones obtenidas con los parámetros cinéticos, tras aplicar el orden de reacción a cada variable de estudio en la experimentación y según los resultados de los análisis de varianza y comparación de medias de las variables de respuesta, para reemplazar en ellas los valores de Q y K anteriormente mencionados.

4.12 Análisis de la información

El análisis de los datos obtenidos se realizó con el programa Statgraphics © Plus Centurión XVII, mediante el cual se aplicó la prueba de comparación de múltiples medias de Tukey al 95% de confianza.

Para las constantes cinéticas de velocidad y la estimación de vida útil, se determinó la bondad de ajuste de los modelos utilizando los parámetros R^2 (coeficiente de determinación), RMSE (raíz cuadrada del error medio cuadrático) y %E (error porcentual) ecuaciones 8 y 9.

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (C_{cal} - C_{exp})^2}{n} \right]^{0.5} \quad (\text{Ec. 8})$$

$$\% E = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|C_{cal} - C_{exp}|n}{C_{exp} n}}{n} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 9})$$

Dónde: C_{exp} : valor experimental; C_{cal} : valor calculado; n : número de determinaciones. Según Brousse et al. (2014) un buen ajuste es indicado por valores pequeños de RMSE ($<0,03$), $\%E < 10\%$ y $R^2 > 0.85$ indicando que los valores del pronóstico son muy aproximados a los valores reales.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Determinación de características físicas

Tabla 3.

Características físicas de la pimienta verde.

	Valor resultante	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Esfericidad	0,989	0,003	0,34
Densidad aparente (g/mL)	0,590	0,030	4,80
Peso de mil granos de pimienta (g)	124	16,730	13,49

Fuente: esta investigación.

Los valores de esfericidad y peso de mil granos de pimienta encontrados son cercanos a los valores reportados por Flores (2009), quien afirma que por las dimensiones de la pimienta la esfericidad debería ser cercana a 1.0 que es el valor de la geometría de una esfera, por otro lado el valor obtenido de densidad aparente es menor con respecto a lo reportado por el autor (1,13 g/mL), lo que podría explicarse debido al alto porcentaje de humedad que presenta la pimienta verde, ya que Yanicci (2002), afirma que el valor de la humedad puede estar relacionado inversamente con la densidad aparente de un producto. Algunos estudios realizados por Buitrago et al. (2004) afirman que la densidad aparente puede estar relacionada con el tamaño y las dimensiones en general de un producto, en su estudio determinaron que los valores de densidad aparente en papa eran mayores en variedades en las que sus dimensiones presentaban incrementos en comparación con el resto de muestras evaluadas.

5.2 Determinación de características bromatológicas

Tabla 4.

Análisis bromatológico pimienta verde.

Parámetro	Pimienta verde (<i>Piper nigrum</i> L.) (g/100g)
Humedad	72,00
Materia seca	28,00
Ceniza	1,14
Extracto etéreo	3,18
Fibra cruda	4,49
Proteína	4,29
Extracto no nitrogenado	14,89
Calcio	103
Hierro	1,08

Fuente: esta investigación.

El análisis bromatológico permite determinar las características nutricionales de un producto, es un excelente procedimiento para realizar un control de calidad y determinar si los productos alcanzan los estándares establecidos por los productores o consumidores (Contreras y Santos, 2012). Los valores obtenidos son comparables a los reportados por Flores (2009), quien trabajó con pimienta gorda (*Dioca* L. Merrill), en cuanto a proteínas (6,09 g/100g) y cenizas (4,2 g/100g). Las diferencias composicionales encontradas con respecto a otros estudios pueden deberse a que este tipo de análisis depende de varios factores, entre los que se encuentran a variedad del producto, la altura, las condiciones del suelo, el clima, los nutrientes y el estado de madurez, entre otros factores (Cortés *et al.*, 2015)

Según Wills *et al.* (1999) en general el contenido de proteínas más alto se da en las hortalizas del género Brassica (3-5g/100g), en las legumbres verdes alrededor de 5g/100g y algo menos en

las hortalizas de fruto o raíz, por lo que se podría considerar a la pimienta verde (*Piper nigrum* L.) como un producto con un aporte proteico considerable, ya que según el estudio realizado en esta investigación cuenta con 4,29 g/100g.

5.3 Comportamiento de las propiedades fisicoquímicas y cinéticas de deterioro de la pimienta verde (*Piper nigrum* L.) durante el almacenamiento.

5.3.1 Índice de respiración.

En la figura 2 para la pimienta envasada con nitrógeno y vacío se observa que inicialmente hay un incremento en los valores de respiración, pero estos disminuyen con el paso del tiempo, a excepción de la pimienta que se encuentra a vacío a 18°C donde se evidencia un incremento al final, para el caso de polipropileno se observa un incremento progresivo de los valores de respiración, a diferencia de los otros envases en los que el incremento inicial fue más drástico aunque al final del ensayo para polipropileno también disminuyen dichos valores.

El incremento inicial en vacío y nitrógeno se debe posiblemente a que los envases se rompen durante la toma de datos con el fin de medir la variable en cuestión, y en este momento cambian inmediatamente las proporciones de gas que rodean a la pimienta retomando así su proceso de respiración, contrario a lo ocurrido con polipropileno, ya que de este envase no fue extraído el aire al momento de sellarlo. Según Mendoza (1994), pasar de una atmósfera pobre en oxígeno y rica en dióxido de carbono (dependiendo del tipo de envase), puede ocasionar fluctuaciones en el comportamiento respiratorio de un producto.

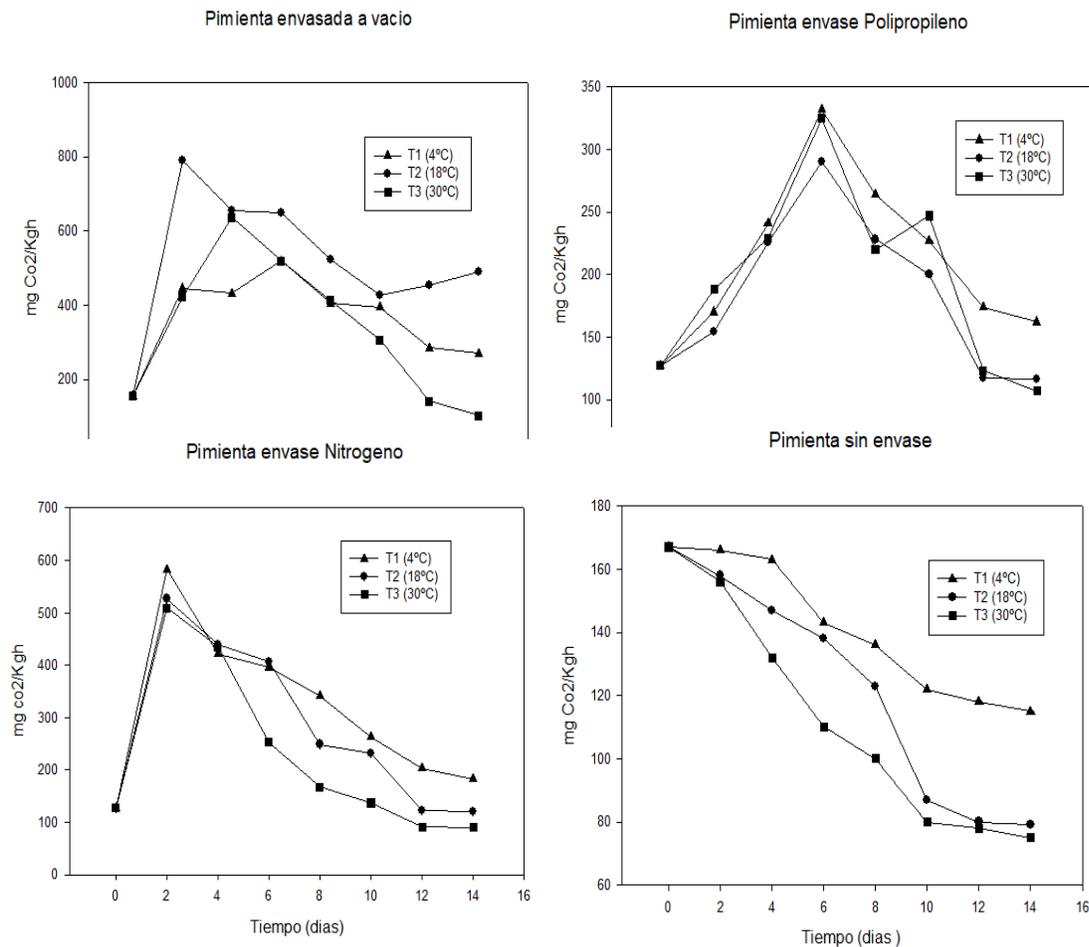


Figura 2. Cinética de respiración Pimienta verde.

Fuente: esta investigación.

En la pimienta sin envase se observó que los valores de respiración disminuyen con el paso del tiempo y hasta el final del ensayo no se observan incrementos, resultados similares fueron reportados por Gonzales et al. (2001). En su trabajo de caracterización poscosecha de carambola, afirman que esta disminución progresiva en los valores de respiración, corresponde a un patrón respiratorio de tipo no climatérico, Kader (1992) y O'Hare (1993), reportan resultados similares para Litchi, piña, limón, cocona y carambola.

La pimienta envasada al vacío, evidencia un incremento en la respiración al final del ensayo en el tratamiento a 18°C. Según Ayala, Valenzuela y Bohórquez (2013) incrementos en valores de respiración pueden deberse al resultado de la degradación, descomposición microbial y senescencia en general de los procesos poscosecha de un producto.

Cabe resaltar que transcurridos aproximadamente 12 días del ensayo, se observó un incremento del volumen a 18°C y 30°C en los envases polipropileno y vacío, fenómeno ocurrido debido a la producción de CO₂ y vapor de agua, propios del proceso de respiración de la pimienta. Según Meneses y Valenzuela (2008), una vez el producto es envasado se llevan a cabo dos procesos simultáneos, la respiración del producto y la permeación de los gases a través del envase para garantizar un equilibrio dentro del mismo. Pero debido a que los envases no eran permeables, no se produjo la salida de CO₂ ni de vapor de agua ocasionando así la hinchazón de los envases. Kandasamy, Moitra y Mukherjee (2012) afirman que bajas temperaturas reducen el proceso de respiración de los productos, lo cual explica porqué el fenómeno no se presentó a 4°C. Para el caso de nitrógeno tampoco se produjo un incremento de volumen en los envases, debido a que este gas permite que se conserven las características del producto durante el almacenamiento (Arévalo Y Castrillón, 2004).



Imagen 19. Pimienta a vacío (18°C) día 1.

Fuente: esta investigación



Imagen 20. Pimienta a vacío (18°C) día 14.

Fuente: esta investigación

5.3.2 Firmeza.

El análisis de varianza para las constantes cinéticas de firmeza en Pimienta verde mostró diferencias significativas ($P < 0.05$) para temperatura de almacenamiento y tipo de empaque, al igual que para sus interacciones (Tabla 5).

Tabla 5.

*Análisis de varianza para firmeza en pimienta verde (*Piper nigrum* L.) bajo diferentes condiciones de almacenamiento.*

Fuente	GL	CM	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES			
A:Temperatura	2	4,2841	0,0000
B:Tipo de empaque	3	2,75963	0,0000
INTERACCIONES			
AB	6	0,247102	0,0029
RESIDUOS	48	0,0629895	
TOTAL (CORREGIDO)	59		

GL: Grados de Libertad, CM: Cuadrados Medios. Fuente: esta investigación.

La prueba de comparación de medias de Tukey para las constantes cinéticas de la variable firmeza (Tabla 6) en las interacciones temperatura y tipo de empaque mostró que a 4°C y 18°C no hay diferencias significativas entre las medias de las constantes cinéticas de los envases con nitrógeno y vacío, pero sí de estos con respecto a polipropileno y sin empaque, siendo polipropileno, en ambos casos, quien presentó una disminución del parámetro firmeza más significativo. Para el caso de la temperatura a 30°C - polipropileno presentó diferencias significativas con respecto al resto de los envases, siendo este quien perdió más firmeza a esta temperatura.

Tabla 6.

*Mínimos cuadrados de constantes cinéticas de firmeza en Pimienta verde (*Piper nigrum L.*) bajo diferentes condiciones de almacenamiento.*

Envase	Temperatura		
	4°C	18°C	30°C
Nitrógeno	0,189 a	0,875 a	1,390 a
Polipropileno	1,372 b	1,730 b	2,177 b
Sin envase	1,169 b	1,661 b	1,556 a
Vacío	0,298 a	1,201 a	1,542 a

Letras diferentes en la misma columna implican diferencias entre promedios, según prueba de Tukey a un 95% de confianza. Fuente: esta investigación.

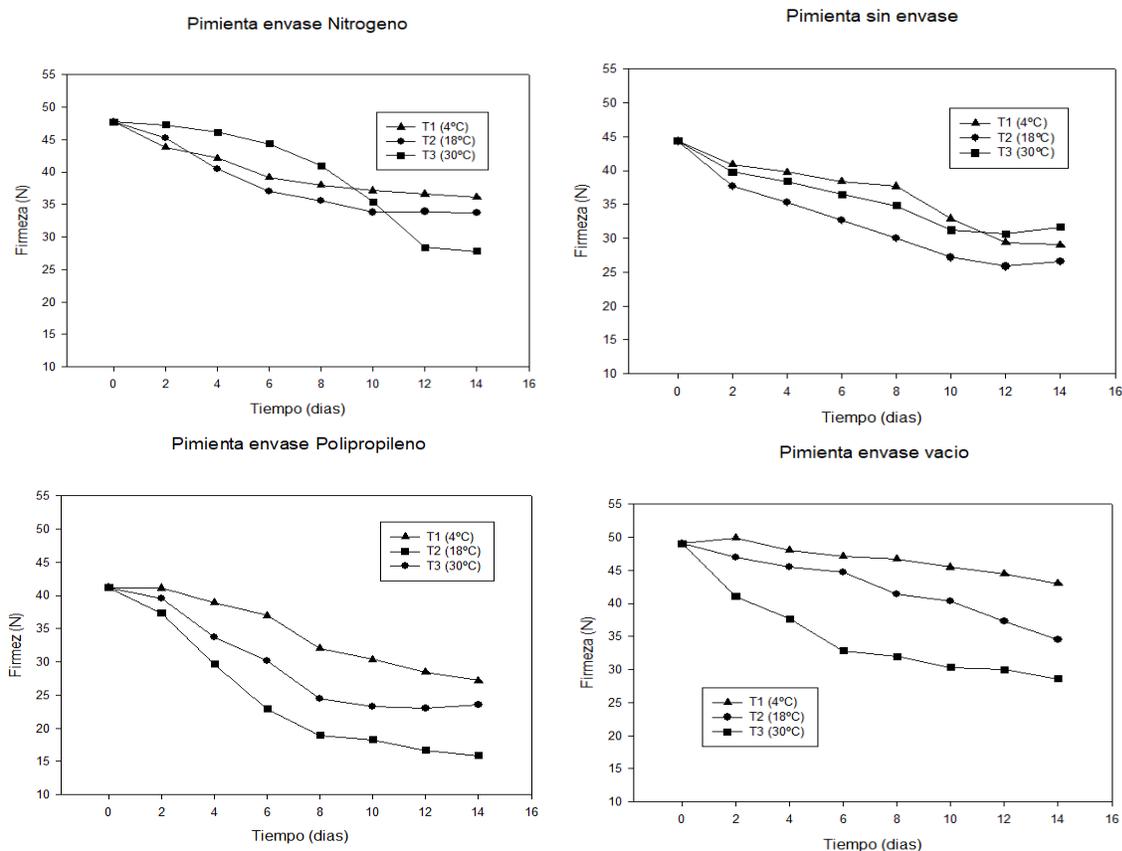


Figura 3. Cinética de firmeza en Pimienta verde (*Piper nigrum* L.).

Fuente: Esta Investigación.

Los parámetros cinéticos de las ecuaciones de orden cero para cambios de firmeza en pimienta verde (*Piper nigrum* L.) bajo diferentes condiciones de envase y temperatura, se muestran en el Anexo 8.

En la figura 3 es posible evidenciar una disminución en la firmeza en los tratamientos, a excepción de la pimienta que se encontraba sin envase a 18°C y 30°C, en donde se puede ver un leve incremento al final del ensayo, debido a que perdió agua durante el tiempo transcurrido en almacenamiento, y al encontrarse sin empaque esta se evaporó, ocasionando una concentración de solutos dentro del material vegetal lo que incrementó los valores de firmeza en la pimienta. Estudios realizados por Cáceres *et al.* (2000) afirman que a temperaturas altas se da un

incremento en la pérdida de agua por transpiración generando un incremento en la firmeza del mismo.

La disminución en los valores de firmeza, especialmente en la pimienta envasada en polipropileno, pueden presentarse debido al deterioro de la estructura de la célula, a los cambios en su composición y también a los procesos bioquímicos que ocurren internamente, además, se trata de un producto contenido en un empaque que no permite la salida de CO₂, por lo que la acumulación excesiva de este gas promueve la formación de ácido carbónico (H₂CO₃) que origina un exudado, y este afecta a los tejidos del producto y la turgencia del mismo, ocasionando una pérdida de firmeza (Moncayo, 2013), por lo tanto este envase resultó ineficiente frente a la conservación del parámetro, ya que contribuyó a la degradación del mismo, en vez de preservarlo. Sin embargo los envases nitrógeno y vacío resultaron efectivos ya que conservaron durante más tiempo la firmeza, debido posiblemente a que retrasaron los procesos metabólicos de la pimienta.

5.3.3. Pérdida de peso

El análisis de varianza para las constantes cinéticas de pérdida de peso en Pimienta verde mostró diferencias significativas ($P < 0.05$) para temperatura de almacenamiento y tipo de empaque, al igual que para sus interacciones (Tabla 7).

Tabla 7.

*Análisis de varianza para pérdida de peso en pimienta verde (*Piper nigrum L.*) bajo diferentes condiciones de almacenamiento.*

Fuente	GL	CM	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES			
A:Temperatura	2	0,990242	0,0000
B:Tipo de empaque	3	1,29589	0,0000
INTERACCIONES			
AB	6	0,0286871	0,0000
RESIDUOS	48	0,00352646	
TOTAL (CORREGIDO)	59		

GL: Grados de Libertad, CM: Cuadrados Medios. Fuente: esta investigación.

La prueba de comparación de medias de Tukey para las constantes cinéticas de la variable pérdida de peso (Tabla 8) en las interacciones temperatura y tipo de empaque mostró que a 4°C no hay diferencias significativas entre las medias de las constantes cinéticas de los envases con nitrógeno y vacío, pero si entre estos con respecto a polipropileno y sin empaque, donde la menor pérdida de peso se presentó en el envase con nitrógeno.

A una temperatura de 18°C no hay diferencias significativas en las medias de las constantes cinéticas de los envases polipropileno y vacío, pero estos si presentan diferencias significativas con respecto a nitrógeno y sin envase, siendo el ensayo sin envase quien presento el mayor porcentaje de pérdida de peso.

Para el caso de la temperatura a 30°C se no se evidenció diferencias significativas entre las medias de las constantes cinéticas en los envases con polipropileno y vacío, pero si entre estos con respecto a los ensayos sin envase y nitrógeno, siendo el ensayo sin envase nuevamente quien presento el mayor valor en pérdida de peso.

Tabla 8.

Mínimos cuadrados de constantes cinéticas de pérdida de peso en Pimienta verde (*Piper nigrum L.*) bajo diferentes condiciones de almacenamiento.

Envase	Temperatura		
	4°C	18°C	30°C
Nitrógeno	0,281 a	0,459 a	0,702 a
Polipropileno	0,581 b	0,750 b	0,848 b
Sin envase	0,836 c	1,189 c	1,451 c
Vacío	0,355 a	0,652 b	0,826 b

Letras diferentes en la misma columna implican diferencias entre promedios, según prueba de Tukey a un 95% de confianza. Fuente: esta investigación.

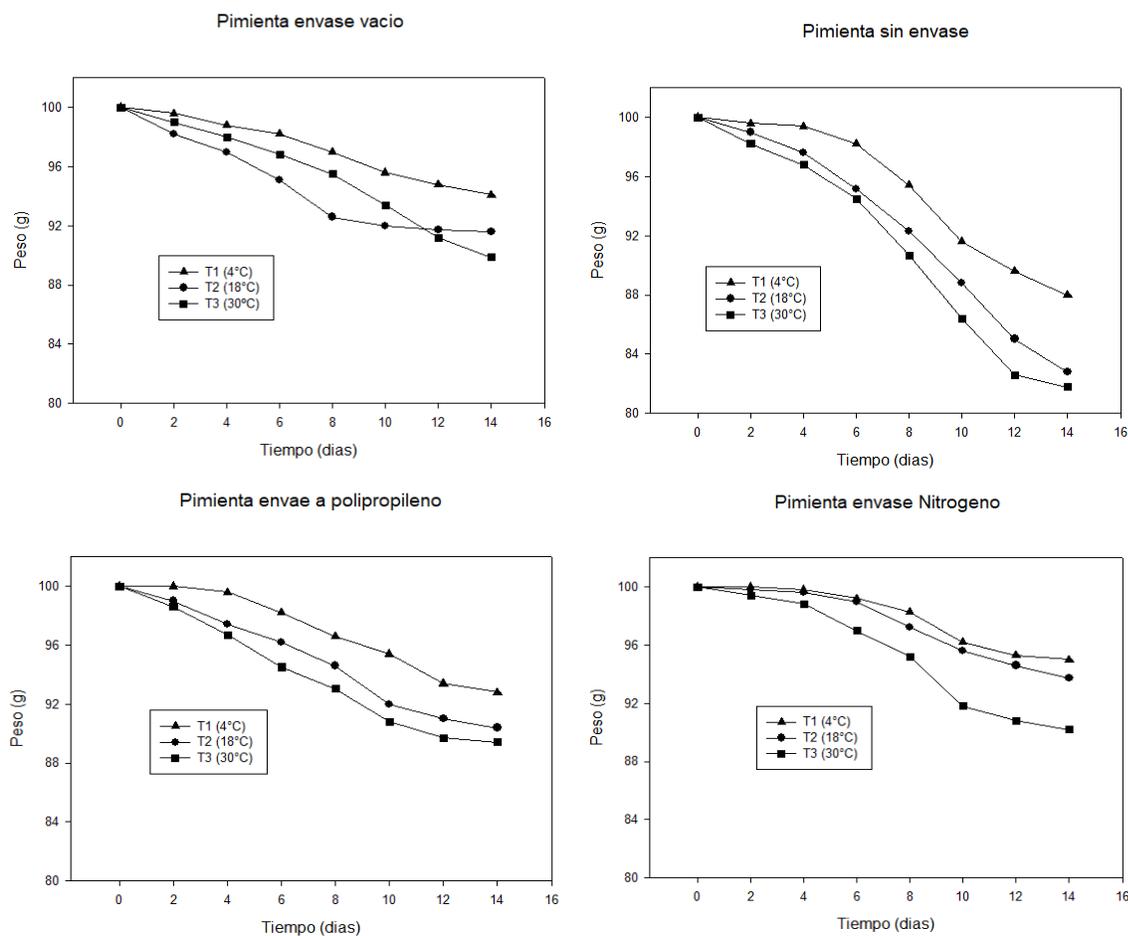


Figura 4. Cinética de pérdida de peso en Pimienta verde (*Piper nigrum L.*).

Fuente: Esta Investigación.

Los parámetros cinéticos de las ecuaciones de orden cero, para pérdida de peso en pimienta verde (*Piper nigrum* L.) bajo diferentes condiciones de envase y temperatura se muestran en el Anexo 10.

Como se observa en la figura 4, el cambio en el peso de la pimienta fue evidente en todos los envases en los que se encontraba almacenada, presentándose las mayores pérdidas a 30°C. Algunos autores citados por Lancho et al. (2007) reportan que los principales causantes de la pérdida de peso en productos agrícolas son los procesos de transpiración y respiración, y que a su vez estos procesos se ven incrementados cuando los productos son almacenados a temperaturas altas.

Kader y Pelayo (2011), mencionan que la pérdida de agua libre es una de las principales causas de deterioro, ya que se originan pérdidas cuantitativas directas, así como pérdidas cualitativas relacionadas con el aspecto.

La pimienta envasada con nitrógeno, vacío y polipropileno, tuvo pérdidas de peso menores a las presentadas por la pimienta que se encontraba sin envase, esto debido a que el material de los envases no permite la entrada ni salida de elementos, y por ende el agua generada en el proceso de transpiración, queda contenida en ellos, creando un ambiente de alta humedad que limita la pérdida posterior de humedad interna. Resultados similares fueron reportados por Collazos et al. (1994), quienes afirman que el número de perforaciones de un empaque es directamente proporcional a la pérdida de agua del material contenido en ellos. Por lo tanto empaques que no permitan la salida de la humedad generada por el producto propician que no se generen pérdidas de peso. En general los envases tuvieron efectos positivos en cuanto a la conservación del peso, ya que no se apreciaron cambios importantes en el parámetro evaluado exceptuando a la pimienta que se encontraba sin envase, la cual tuvo pérdidas del 10% aproximadamente a temperaturas de

refrigeración. Beltrán (2010) reporta que pérdidas de peso del 10% en adelante hacen que un producto pueda ser considerado como inaceptable en el mercado.

5.3.4. Humedad (%)

El análisis de varianza para las constantes cinéticas de humedad en Pimienta verde mostró diferencias significativas ($P < 0.05$) para temperatura de almacenamiento y tipo de empaque, al igual que para sus interacciones (Tabla 9).

Tabla 9.

Análisis de varianza para humedad en pimienta verde (Piper nigrum L.) bajo diferentes condiciones de almacenamiento.

Fuente	GL	CM	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES			
A:Temperatura	2	0,000618796	0,0000
B:Tipo de empaque	3	0,000200047	0,0000
INTERACCIONES			
AB	6	0,0000302616	0,0000
RESIDUOS	48	0,00000173217	
TOTAL (CORREGIDO)	59		

GL: Grados de Libertad, CM: Cuadrados Medios. Fuente: esta investigación.

La prueba de comparación de medias de Tukey para las constantes cinéticas de la variable humedad (Tabla 10) muestra que en las interacciones temperatura y tipo de empaque a 4°C y 18°C no hay diferencias significativas entre las medias de las constantes cinéticas en los envases con nitrógeno y vacío, pero si entre estos con respecto a polipropileno y el ensayo sin empaque, por lo que se puede deducir que tanto nitrógeno como vacío, quienes presentaron valores pequeños de la constante, son igual de factibles estadísticamente para conservar el porcentaje de humedad en la pimienta a estas temperaturas. Para el caso de la temperatura a 30°C entre las

medias de las constantes cinéticas en los envases con polipropileno y vacío no hubo diferencias significativas pero si entre estos con respecto a nitrógeno y sin envase, siendo el ensayo sin envase quien tuvo mayor pérdida del porcentaje de humedad en la pimienta.

Tabla 10.

Mínimos cuadrados de constantes cinéticas de humedad en Pimienta verde (Piper nigrum L.) bajo diferentes condiciones de almacenamiento.

Envase	Temperatura		
	4°C	18°C	30°C
Nitrógeno	0,002 a	0,004 a	0,009 a
Polipropileno	0,004 b	0,008 b	0,015 b
Sin envase	0,007 c	0,011 c	0,024 c
Vacío	0,003 a	0,006 a	0,012 b

Letras diferentes en la misma columna implican diferencias entre promedios, según prueba de Tukey a un 95% de confianza. Fuente: esta investigación.

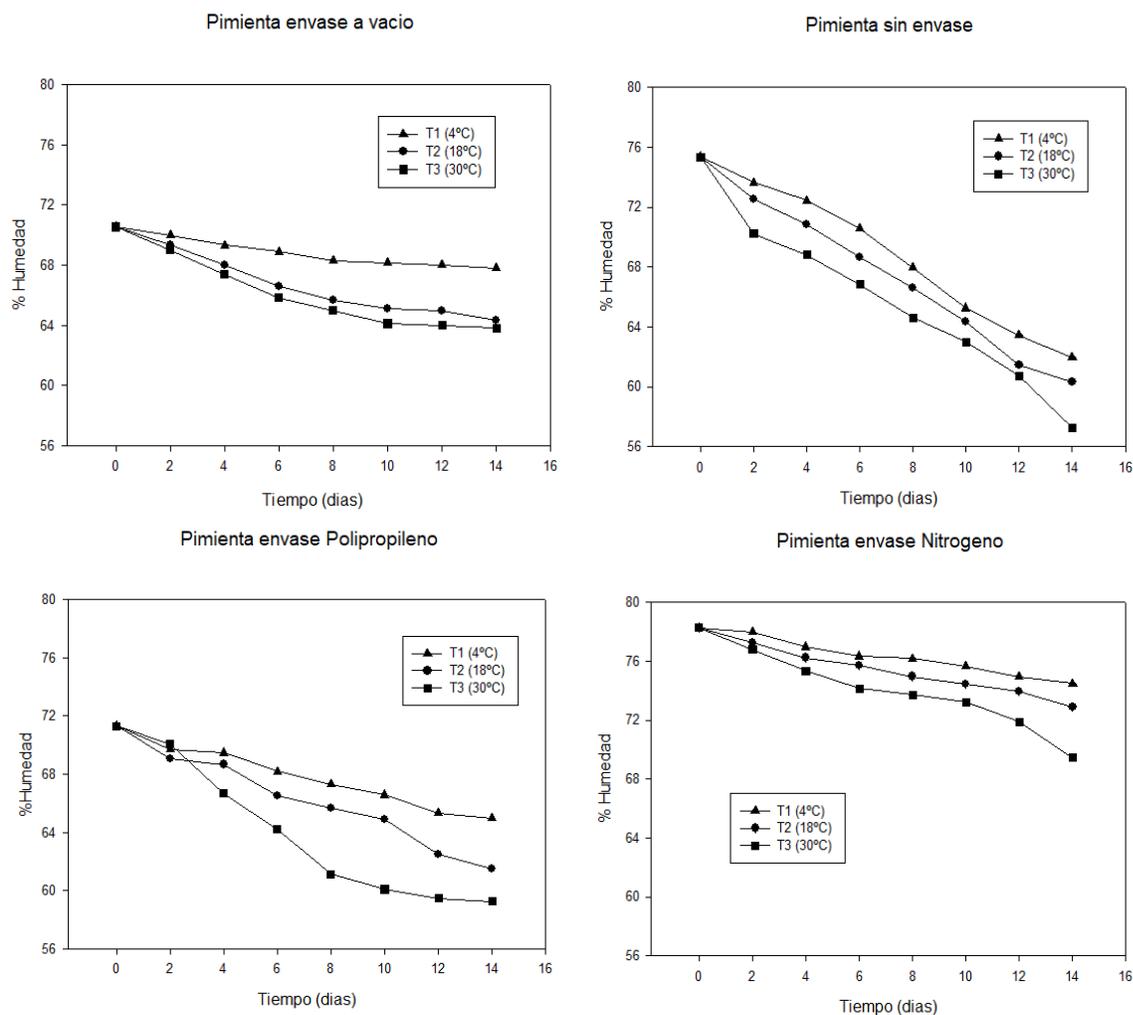


Figura 5. Cinética de Humedad en Pimienta verde (*Piper nigrum* L.).

Fuente: Esta Investigación

Los parámetros cinéticos de las ecuaciones de orden uno para cambios de Humedad en pimienta verde (*Piper nigrum* L.) bajo diferentes condiciones de envase y temperatura, se muestran en el Anexo 12.

En la figura 5 se evidencia que a medida que transcurre el tiempo del ensayo el porcentaje de humedad disminuye, siendo más evidente el cambio en la pimienta que se encontraba sin envase ya que el agua existente como fase líquida se perdió simultáneamente a través del proceso de transpiración (Umaña, 2010). En los envases con nitrógeno y vacío, el cambio en los valores de

humedad no fue drástico debido a que al extraer el aire, los procesos biológicos de la pimienta disminuyeron, por lo tanto funcionaron para prolongar este parámetro en el tiempo. Cabe mencionar que debido a la no permeabilidad de los envases, la condensación de agua dentro de los mismos puede influir sobre los valores de humedad, Sandhya (2010) afirma que la humedad que queda contenida dentro de los empaques genera sobre la superficie de los productos una condensación de vapor de agua que al parecer disfraza la pérdida de humedad.

Para el caso de la pimienta envasada en polipropileno, también se presentaron pérdidas significativas de humedad además de olores desagradables, posiblemente debido a la no permeabilidad de los empaques antes mencionada, y a que al no extraer el aire de este envase los procesos biológicos no fueron frenados, por lo que no resulta eficiente a la hora de conservar este parámetro.

5.3.5. Índice de color

El análisis de varianza para las constantes cinéticas de índice de color en Pimienta verde mostró diferencias significativas ($P < 0.05$) para temperatura de almacenamiento y tipo de empaque, al igual que para sus interacciones (Tabla 11).

Tabla 11.

*Análisis de varianza para índice de color en pimienta verde (*Piper nigrum L.*) bajo diferentes condiciones de almacenamiento.*

Fuente	Gl	CM	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES			
A:Temperatura	2	8,62884	0,0000
B:Tipo de empaque	3	2,05557	0,0000
INTERACCIONES			
AB	6	0,829887	0,0000
RESIDUOS	48	0,041119	
TOTAL (CORREGIDO)	59		

GL: Grados de Libertad, CM: Cuadrados Medios. Fuente: esta investigación.

La prueba de comparación de medias de Tukey para las constantes cinéticas de la variable índice de color (Tabla 12) en las interacciones temperatura y tipo de empaque mostró que a 4°C el envase con nitrógeno presenta diferencias significativas con respecto al resto de envases, siendo este quien tiene el menor valor de K a esta temperatura; para 18°C, polipropileno y vacío presentaron diferencias significativas con respecto al resto de los envases, siendo sin envase quien presento los valores de la constante cinética más altos a esta temperatura. Para el caso de la temperatura a 30°C no hubo diferencias significativas entre las medias de las constantes cinéticas para polipropileno y vacío pero si entre estas con respecto a nitrógeno y sin envase, siendo el ensayo sin envase quien tuvo el mayor valor de la constante cinética.

Tabla 12.

Mínimos cuadrados de constantes cinéticas de índice de color en Pimienta verde (*Piper nigrum L.*) bajo diferentes condiciones de almacenamiento.

Envase	Temperatura		
	4°C	18°C	30°C
Nitrógeno	0,221 a	0,387 a	0,544 a
Polipropileno	0,328 b	0,655 b	1,920 b
Sin envase	0,355 b	1,468 c	2,006 c
Vacío	0,312 b	0,462 b	1,913 b

Letras diferentes en la misma columna implican diferencias entre promedios, según prueba de Tukey a un 95% de confianza. Fuente: esta investigación.

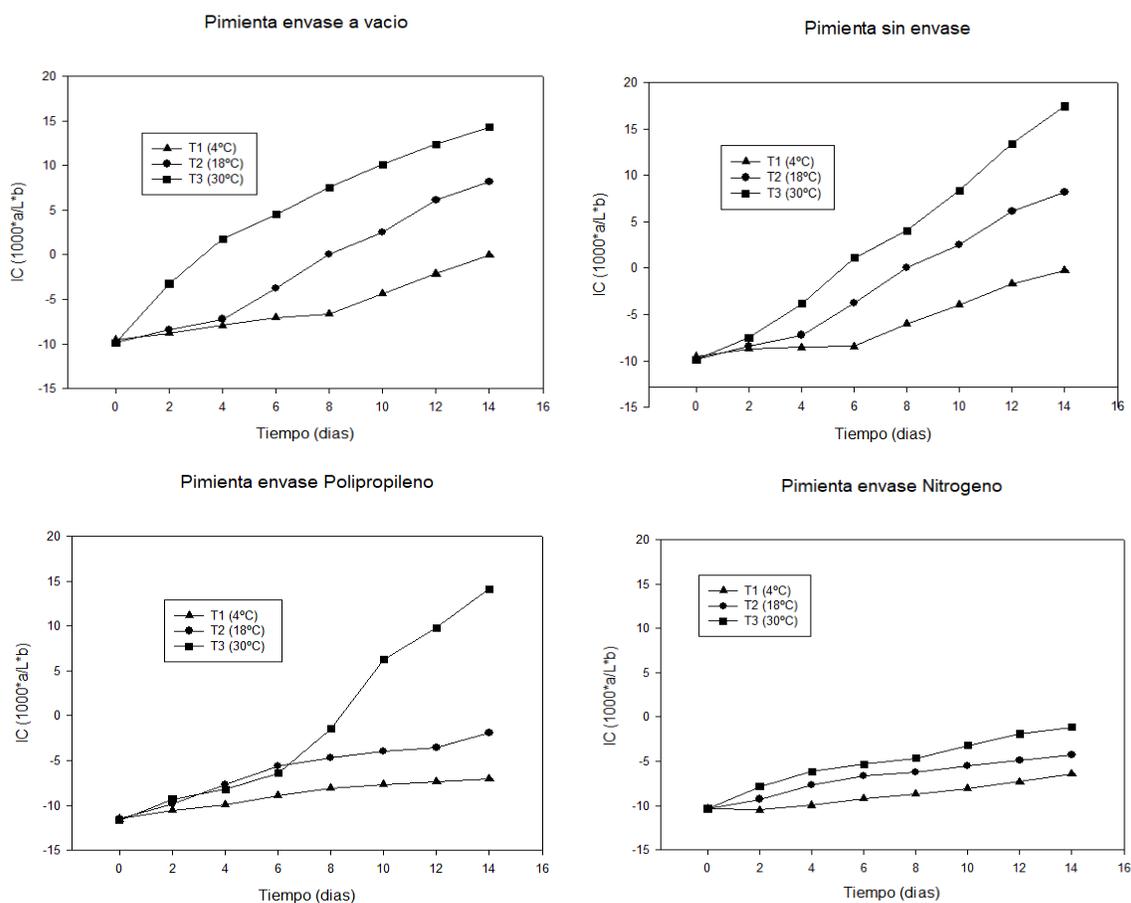


Figura 6. Cinética de color en Pimienta verde (*Piper nigrum L.*).

Fuente: Esta Investigación

Los parámetros cinéticos de las ecuaciones de orden cero para los cambios del Índice de color en pimienta verde (*Piper nigrum* L.) bajo diferentes condiciones de envase y temperatura, se muestran en el Anexo 14.

Al transcurrir los días del ensayo, los valores de índice de color en la pimienta tienden a volverse positivos (Figura 6) en la mayoría de las condiciones de almacenamiento, excepto para la pimienta envasada en nitrógeno donde a pesar de que se aprecia un incremento en los valores, estos continúan en el rango de los negativos hasta el final del ensayo. Los cambios más drásticos de color se presentaron a 30°C en todos los envases, y para el caso de la pimienta sin envase el cambio fue evidente a los pocos días de iniciar el ensayo.

Vignoni et al. (2006) reportan que valores de índice de color entre -20 a -2 se relacionan con colores que van del verde profundo al verde amarillento; la pimienta envasada con nitrógeno se mantuvo en un rango entre -12 a -1 aproximadamente, lo que evidencia que el cambio de color en este caso no fue evidente, e indica que el tratamiento funciona para conservar este parámetro, ya que logra mantener la coloración verde de la pimienta durante más tiempo. Resultados similares fueron reportados por Nasar *et al.* (2008) quienes afirman que el nitrógeno es eficaz para prevenir el oscurecimiento del color a un nivel apreciable, mientras que el almacenamiento en presencia de oxígeno acelera el proceso de oscurecimiento en los productos.

Finalizado el ensayo el color de la pimienta que se encontraba sin envase y en general la que se almacenó a 30°C (excepto nitrógeno) tomó un color bastante oscuro alcanzando una tonalidad café, en el caso de la pimienta a 30°C esta coloración se presentó a los pocos días de iniciados los ensayos, debido a que los productos expuestos a temperaturas elevadas aceleran sus procesos degenerativos. Cabe mencionar que en estado natural la pimienta después de ser cosechada llega a esta coloración café con el paso del tiempo. Ceballos y Jiménez (2012) afirman que los cambios de color en los productos, son causados generalmente por reacciones de conversión de

polifenoles en policarbonilos, degradaciones oxidativas del ácido ascórbico, reacciones de degradación de los pigmentos como los carotenoides, las antocianinas y betalaínas (cambian a compuestos oscuros), entre otros.

La pimienta almacenada a 18°C en los envases polipropileno y vacío presentaron una coloración amarillenta con el paso del tiempo. Este cambio de color de verde oscuro a verde amarillento pudo deberse posiblemente a la no permeabilidad de los empaques, como se mencionó anteriormente, los empaques generaron en su interior un exceso de humedad y CO₂, que en combinación pudieron causar daños y alteraciones en los procesos fisiológicos de la pimienta, causando en este caso no solo la degradación del color, sino en general alterando todas sus características; por ende no son envases efectivos para conservar este parámetro en el tiempo, ya que propician coloraciones indeseadas en el producto.



Imagen 21. Pimienta envase a vacío (18°C) 12 días.

Fuente: esta investigación



Imagen 22. Pimienta sin envase (18°C) 14 días.

Fuente: Esta investigación

6. ESTIMACIÓN DE VIDA ÚTIL

Para determinar la vida útil de la pimienta, se tomaron como parámetros a evaluar: el índice de color, pérdida de peso, humedad y firmeza, -que son atributos importantes para el consumidor ya que a través de estos se puede determinar el cambio de estado y la calidad del producto.

La estimación de vida útil constituye una herramienta para predecir cómo se va a comportar el producto almacenado a distintas condiciones, y optimizar el manejo de estas variables para que la calidad del producto almacenado pueda tener las características deseadas (Castellanos *et al.*, 2011).

En la a figura 7 se muestra la representación gráfica de la ecuación de Arrhenius, para los parámetros firmeza, pérdida de peso, porcentaje de humedad e índice de color en pimienta verde.

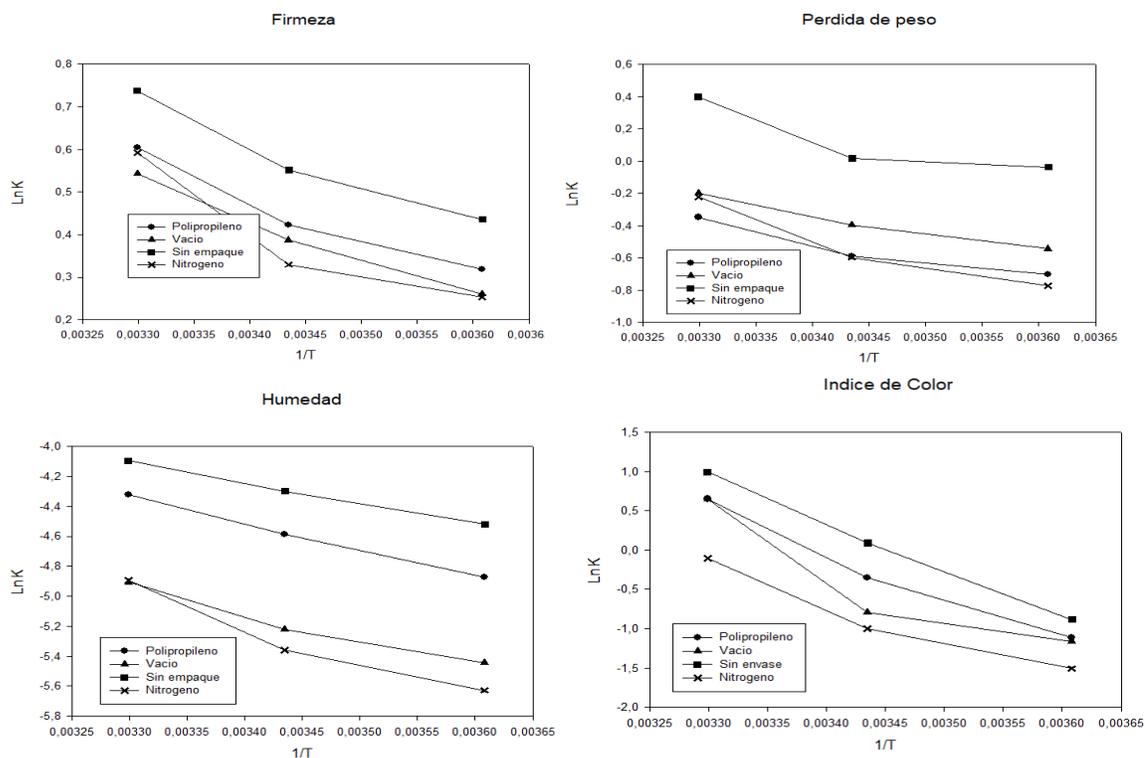


Figura 7. Ecuación de Arrhenius para cambios de firmeza, pérdida de peso, porcentaje de humedad e índice de color en pimienta verde (*Piper nigrum* L.)

Fuente: Esta Investigación

En las tablas 13 a 16 se presentan los parámetros cinéticos y la bondad de ajuste para cada empaque y el dato de energía de activación (Ea) de firmeza, pérdida de peso, porcentaje de humedad e índice de color respectivamente.

Tabla 13.

Promedios de parámetros cinéticos y bondad de ajuste ecuación de Arrhenius para cambios de firmeza en pimienta (*Piper nigrum* L.).

Envase	m*10⁺³ (días⁻¹)	R²(%)	%E	RMSE	Ea(KJ*mol⁻¹)
Polipropileno	1,52	89,00	8,10	0,054	12,64
Vacío	1,75	96,26	4,73	0,056	14,61
Sin envase	1,21	89,41	5,59	0,072	10,12
Nitrógeno	2,75	97,03	10,52	0,053	22,92

m: pendiente, R²: Coeficiente de Determinación, E: Error Porcentual, RMSE: raíz cuadrada del error medio cuadrático, Ea: Energía de activación.

Fuente: Esta Investigación

Los valores de energía de activación representan la energía mínima requerida que las moléculas utilizan para su movilidad dentro del producto, esta se relaciona con la temperatura, puesto que a temperaturas altas la energía de activación disminuye (Vega et al., 2007). De los datos de energía de activación obtenidos en las tablas 13 a 16 se puede deducir que la pimienta envasada con nitrógeno fue quien presento la energía de activación más alta en cada parámetro evaluado en comparación con el resto de los envases.

Tabla 14.

Promedios de parámetros cinéticos y bondad de ajuste ecuación de Arrhenius para pérdida de peso en pimienta (*Piper nigrum* L.).

Envase	$m \cdot 10^{+3}$ (días ⁻¹)	R ² (%)	%E	RMSE	Ea(KJ*mol ⁻¹)
Polipropileno	1,33	94,46	12,61	0,045	11,11
Vacío	1,46	93,34	9,55	0,037	12,15
Sin envase	1,12	89,54	6,73	0,022	9,37
Nitrógeno	2,05	96,93	7,40	0,094	17,04

m: pendiente, R²: Coeficiente de Determinación, E: Error Porcentual, RMSE: raíz cuadrada del error medio cuadrático, Ea: Energía de activación.

Fuente: Esta Investigación.

Según Ruiz et al. (2014) la pérdida de peso se encuentra relacionada con la temperatura de manera directa, cuando los productos son almacenados a bajas temperaturas, el porcentaje de pérdida de peso es menor, en comparación con productos almacenados a temperaturas elevadas.

Tabla 15.

Promedios de parámetros cinéticos y bondad de ajuste ecuación de Arrhenius para cambios de humedad en pimienta (*Piper nigrum* L.).

Envase	$m \cdot 10^{+3}$ (días ⁻¹)	R ² (%)	%E	RMSE	Ea(KJ*mol ⁻¹)
Polipropileno	1,71	97,18	0,75	0,041	14,25
Vacío	1,77	99,76	0,40	0,018	14,74
Sin envase	1,36	99,79	0,25	0,011	11,36
Nitrógeno	2,33	94,96	1,32	0,074	19,40

m: pendiente, R²: Coeficiente de Determinación, E: Error Porcentual, RMSE: raíz cuadrada del error medio cuadrático, Ea: Energía de activación.

Fuente: Esta Investigación.

Andrade et al. (2012) afirman los empaques con baja o nula permeabilidad son más eficientes evitando pérdidas de humedad, debido a que no permiten la salida del agua producida por la transpiración, y generan un ambiente de alta humedad que limita la pérdida de la misma en el producto.

Tabla 16.

Promedios de parámetros cinéticos y bondad de ajuste ecuación de Arrhenius para cambios de índice de color en pimienta (*Piper nigrum* L.).

Envase	$m \cdot 10^{+3}$ (días ⁻¹)	R ² (%)	%E	RMSE	Ea(KJ*mol ⁻¹)
Polipropileno	5,53	92,21	5,68	0,025	46,02
Vacío	5,65	97,87	5,02	0,029	46,99
Sin envase	4,17	97,66	9,33	0,035	34,74
Nitrógeno	6,02	87,85	2,51	0,009	50,05

m: pendiente, R²: Coeficiente de Determinación, E: Error Porcentual, RMSE: raíz cuadrada del error medio cuadrático, Ea: Energía de activación.

Fuente: Esta Investigación.

Los cambios de color en general pueden deberse a reacciones oxidativas, degradación de los pigmentos o reacciones enzimáticas, en este caso, debido a que los empaques no permiten la salida ni la entrada de compuestos, la humedad que se produce por transpiración queda depositada sobre la superficie del producto, lo que puede ocasionar decoloraciones, daños en tejidos y en general deterioro de la pimienta. Mónaco et al. (2005) afirman que la utilización de empaques selectivos contribuye a que no se presenten este tipo de daños.

6.1 Tiempos de vida útil

En la tabla 17, se presenta un consolidado de las ecuaciones después de aplicar Arrhenius para cada atributo de calidad. El ajuste de datos experimentales mostró que las ecuaciones obtenidas, describen adecuadamente cada atributo, como lo muestran los valores de R^2 , RMSE y %E (Tablas 13 a 16).

Tabla 17.

Consolidado de ecuaciones de Arrhenius para las variables evaluadas.

Variables	Ecuación	R²(%)	%E	RMSE
Firmeza	$\text{Ln K} = - 2757,3 * \frac{1}{T} + 9,2941$	97,03	10,52	0,053
Pérdida de peso	$\text{Ln K} = - 2050,6 * \frac{1}{T} + 6,4715$	96,93	7,40	0,094
Color (IC)	$\text{Ln K} = - 5652,8 * \frac{1}{T} + 19,216$	97,87	5,02	0,029
Humedad	$\text{Ln K} = - 1366,9 * \frac{1}{T} + 0,4071$	99,79	1,25	0,011

K: Constante de velocidad de orden 0 o 1, T: Temperatura en Kelvin, R^2 : Coeficiente de Determinación, E: Error Porcentual, RMSE: raíz cuadrada del error medio cuadrático.

Fuente: Esta Investigación.

Las ecuaciones de la tabla 17 permiten calcular constantes cinéticas a diferentes temperaturas para cada atributo, reemplazando el valor de la temperatura en grados Kelvin. En la tabla 18 se muestra valores de K para las temperaturas propuestas 4°C, 10°C y 24°C.

Tabla 18.**Constantes cinéticas (K) a diferentes temperaturas para las variables evaluadas.**

Parámetro	Constante Cinética K (días⁻¹)		
	4°C	10°C	24°C
Firmeza	0,519	0,641	1,015
Pérdida de peso	0,395	0,462	0,650
Color (IC)	0,307	0,473	1,212
Humedad	0,010	0,012	0,015

Fuente: esta investigación

Para la estimación del tiempo de vida útil, se debe definir los atributos de calidad que presentan mayor relevancia. Beltrán (2010), afirma que pérdidas de peso del 10% en adelante representan un producto inaceptable, por lo tanto para los datos experimentales se toma como límite este porcentaje de pérdida de peso. Con respecto al índice de color, Vignoni et al. (2006) reportan que valores entre -5 y -1 ya no son aceptables (colores que van del verde profundo al verde amarillento). Por último, para firmeza y porcentaje de humedad, Q fue el valor mínimo promedio obtenido en la experimentación (30N y 60% respectivamente).

En la tabla 19 se presentan las ecuaciones del envase nitrógeno, ya que fue estadísticamente quien conservo mejor cada parámetro evaluado, obtenidas con los parámetros cinéticos, tras aplicar el orden de reacción a cada variable de estudio en la experimentación (Anexo 8, 10, 12, 14) y según los resultados de los análisis de varianza y comparación de medias de las variables firmeza, pérdida de peso, índice de color y porcentaje de humedad.

Tabla 19.**Consolidación de parámetros cinéticos de las variables evaluadas en N₂**

Parámetro	Orden	Ecuación	Q	R ² (%)	%E	RMSE
Firmeza	0	$Q = - K * t + 48,891$	30 N	94,80	1,62	0,98
Peso	0	$Q = - K * t + 101,01$	90 g	95,54	0,73	0,79
Color	0	$Q = K * t - 8,1833$	-1	98,92	1,46	0,15
Humedad	1	$\text{Ln } Q = - K * t + 4,3567$	60%	98,83	0,04	0,02

K: Constante de velocidad de orden 0 o 1, Q: Valor atributo al tiempo, R²: Coeficiente de Determinación, E: Error Porcentual, RMSE: raíz cuadrada del error medio cuadrático.

Fuente: Esta Investigación.

Para cada una de las ecuaciones de la tabla 19 se despeja el tiempo y se reemplaza los valores de Q y de K (Tabla 18) dependiendo de la temperatura a la cual se desea estimar el tiempo de vida útil.

En la tabla 20, se observan los días de vida útil estimados, donde la pimienta conserva sus características a las diferentes temperaturas de almacenamiento propuestas y el mejor envase según el análisis estadístico inicial para cada variable de estudio el cual fue nitrógeno.

Tabla 20.**Días estimados de vida útil a diferentes temperaturas de almacenamiento.**

Parámetro	Vida útil (días)		
	4°C	10°C	24°C
Firmeza	36	29	19
Pérdida de peso	28	24	16
Color (IC)	23	15	6
Humedad	24	21	17

Fuente: esta investigación

En general los consumidores desean encontrar productos que cumplan con todas sus expectativas, aunque según Valencia, Cortés y Román (2012) el color es uno de los parámetros más importantes a la hora de seleccionar un producto, ya que es percibido inmediatamente por el consumidor y es en cierta medida un indicador de las reacciones que ocurren en los alimentos durante el proceso de almacenamiento bien sea por degradación o formación de compuestos.

El cambio de coloración en la pimienta suponía uno de los problemas más grandes a la hora de la comercialización, debido a que es un producto para consumo en fresco, por lo tanto, y teniendo en consideración esto, se toma el atributo Índice de color como indicador de vida útil, que a una temperatura de almacenamiento de 4°C con un envase de nitrógeno y bajo las mismas condiciones de este estudio conserva la pimienta verde por aproximadamente 23 días.

A continuación se presenta el estimado del tiempo de vida útil de la pimienta verde en los diferentes envases, a las temperaturas propuestas tomando como parámetro el índice de color.

En la tabla 21 se encuentran las ecuaciones con el mejor R^2 de los diferentes envases obtenidas con los parámetros cinéticos, tras aplicar el orden de reacción para índice de color en la experimentación (Anexo 14).

Tabla 21.**Consolidación de parámetros cinéticos de índice de color en cada envase**

Parámetro	Orden	Ecuación	Q	R ² (%)	%E	RMSE
Nitrógeno	0	$Q = K * t - 8,1833$	-1	98,92	1,46	0,15
Vacío	0	$Q = K*t - 6,5447$	-1	98,26	8,79	0,42
polipropileno	0	$Q = K*t - 6,0008$	-1	99,63	1,93	0,12
Sin envase	0	$Q = K*t - 5,0428$	-1	97,47	4,83	0,47

K: Constante de velocidad de orden 0 o 1, Q: Valor atributo al tiempo, R²: Coeficiente de Determinación, E: Error Porcentual, RMSE: raíz cuadrada del error medio cuadrático.

Fuente: Esta Investigación.

Para cada una de las ecuaciones de la tabla 21 se despeja el tiempo y se reemplaza los valores de Q y de K (Tabla 18) dependiendo de la temperatura a la cual se desea estimar el tiempo de vida útil.

Tabla 22.**Estimación de vida útil para el parámetro índice de color en cada envase**

Envase	Vida útil (días)		
	4°C	10°C	24°C
Nitrógeno	23	15	6
Vacío	18	12	5
Polipropileno	16	11	4
Sin envase	13	9	3

Fuente: esta investigación

Como se observa en la tabla 22 el envase con nitrógeno en combinación con el almacenamiento a bajas temperaturas permitió la conservación de las características de la pimienta verde por más tiempo, en comparación con, vacío, polipropileno y sin envase, debido a que retrasó los procesos biológicos de la pimienta, dando como resultado un incremento en el tiempo de vida útil.

La refrigeración es un factor importante y por ende debería prolongarse más allá del almacenamiento en la empresa, la implementación de unidades de frío en los camiones que transportan la pimienta es una solución que contribuye a disminuir pérdidas ya que los productos pueden transportarse sin comprometer su calidad, de esta manera y con la implementación de atmósferas modificadas, se puede disminuir el riesgo de pérdidas durante el transporte, además se recomienda el uso de empaques selectivos para potencializar los efectos de la aplicación de atmósferas modificadas.

Sergio et al. (2016) afirman que aplicar tratamientos con atmósferas modificadas contribuye a prolongar la conservación de los atributos característicos de un producto en fresco, sin embargo, es difícil que los productos superen un periodo mayor a 60 días manteniendo intactas sus características iniciales, debido a que la naturaleza y cualidades de dichos productos son muy cambiantes y difíciles de mantener incluso bajo condiciones de almacenamiento que las favorezcan.

7. CONCLUSIONES

- Se encontró que en general las características físicas y bromatológicas de la pimienta verde presentan similitudes con respecto a otras variedades de pimienta, algunas diferencias encontradas pueden ser atribuidas al hecho de que este tipo de análisis dependen de varios factores tales como el manejo poscosecha, la variedad, el almacenamiento, entre otros.
- La pimienta envasada con nitrógeno fue estadísticamente quien presentó los valores de constantes cinéticas más bajos en todas las variables evaluadas, por lo que este envase en combinación con bajas temperaturas tiene efectos positivos sobre la conservación de la pimienta, caso contrario a polipropileno y sin envase que presentaron los valores más altos de las constantes cinéticas respectivamente.
- Mediante la ecuación de Arrhenius se estimó el tiempo de vida útil de la pimienta, se tomó como parámetro el índice de color y se obtuvo que nitrógeno a 4°C conserva las características de la pimienta verde por aproximadamente 23 días.

8. RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio de factibilidad para evaluar la rentabilidad de la implementación de un envase con nitrógeno para la conservación de las características fisicoquímicas de la pimienta.
- Se recomienda la utilización de envases selectivos para evitar condensaciones dentro de los mismos, y evitar el deterioro de las características fisicoquímicas de la pimienta.
- Se recomienda la realización de evaluaciones sensoriales con un grupo de jueces entrenados para evaluar las diferencias de las características fisicoquímicas de la pimienta entre envases almacenados a diferentes temperaturas.
- Realizar un estudio similar en el que se implemente la utilización de mezcla de gases y comparar la eficiencia entre ellos.
- Realizar un estudio de los cambios en las propiedades composicionales y nutricionales durante el almacenamiento en pimienta verde.

REFERENCIAS

- Andrade, R., Palacio, J., Pacheco, W., Betin, R. (2012). Almacenamiento de Trozos de Ñame (*Dioscorea rotundata Poir*) en Atmósferas Modificadas. *Información tecnológica*. 23(4).
- Arévalo, M., Castrillón, J., (2004). Almacenamiento de café tostado y molido en atmosfera de nitrógeno y gas carbónico. *Cenicafé*. 55(1), 5-15.
- ASOPROP, 2001, Generalidades del cultivo de la pimienta en la amazonia colombiana: pautas iniciales para el manejo del cultivo de la pimienta en el departamento del Putumayo. Recuperado de: <http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/4844/1/Generalidades%20del%20cultivo%20de%20la%20pimienta.pdf>
- Atarés, L. (2009). Resolución problema cinético (n, K). Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10251/6821>.
- Aular, J., Ruggiero, C., Durigan, J. (2001). Efecto de la envoltura plastica y el tiempo de almacenamiento sobre el comportamiento en poscosecha de frutos de parchita maracuya. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín*, 13(1), 15–21.
- Ayala, L., Valenzuela, C., Bohorquez. Y. (2013). Caracterización fisicoquímica de mora de castilla (*Rubus glaucus benth*) en seis estados de madurez. *Revista facultad de ciencias agrarias*. 11(2), 10-18
- Baldizon, C., Valle, G., y Córdoba, M. (2011). Evaluación de la vida útil de una pasta de tomate mediante pruebas aceleradas por temperatura. *Ingeniería*, 21(2), 31-38.

- Beltran, A. (2010). Estudio de la vida útil de fresas (*Fragaria vesca*) mediante tratamiento con luz ultravioleta de onda corta uv-c. Universidad técnica de Ambato. *Revista tecnológica*. 23(2).
- Bernal, I. (1998). *Análisis de alimentos*. 3rd ed. Bogotá. G. LTDA, Ed. 218
- Brousse, M., Vergara, M., Zubreski, E., Cruz, N., y Martos, M. (2014). Cinética de absorción de agua de tejidos de mandioca macerados con una poligalacturonasa microbiana. *Revista de Ciencia Y Tecnología*, 16(22), 53–57.
- Buitrago, G., Lopez, A., Coronado, A., Osorno, F., (2004). Determinación de las características físicas y propiedades mecánicas en papa cultivada en Colombia. *Revista brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental*. 8(1), 102-110.
- Cáceres, I., Mulkay, T., Rodríguez, J., y Paumier, A. (2000). Conservación de productos hortofrutícolas. Recuperado de: <http://www.fao.org/docs/eims/upload/cuba/5012/cuf0127s.pdf>.
- Calero, A., (2012). Evaluación agroindustrial del ajo de monte (*Mansoa Alliacea*). Recuperado de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4866/1/CD-4459.pdf>.
- Cano, T., Chávez, B., Godínez, j., Monzón, D. (2002). Obtención y caracterización del aceite esencial y oleorresina de la pimienta negra (*piper nigrum* l.) cultivada en Guatemala, una alternativa de desarrollo agroindustrial para el agricultor guatemalteco. Recuperado de: <http://digi.usac.edu.gt/bvirtual/informes/puidi/INF-2002-041.pdf>
- Castellanos, D., Algecira, N., Villota, C. (2011). Aspectos relevantes en el almacenamiento de banano en empaques con atmosferas modificadas. *Rev. Iber. Tecnología Poscosecha*. 12(2), 114-134

- Carretero, M. (2009). Propiedades terapéuticas de la pimienta (*Piper nigrum* L.). PORTALFARMA. Recuperado de: <https://botplusweb.portalfarma.com/Documentos/2009/9/29/40643.pdf>
- Ceballos, E., Jiménez, M. (2012). Cambios en las propiedades de frutas y verduras durante la deshidratación con aire caliente y su susceptibilidad al deterioro microbiano. *Temas selectos de ingeniería de alimentos*. 6(1), 98-110.
- Celale, K., Blagoj, M., Gurbuz, G., Philip, M. (2014). Combined effects of gamma-irradiation and modified atmosphere packaging on quality of some spices. *Food Chemistry*. 255-261.
- Collazos, O., Bautista, G., Millán, B., Mapura, B. (1994). Efecto de bolsas de polietileno en la conservación de maracuyá, curuba y tomate. *Acta agronómica*. 34(2). 53-59.
- Contreras, N., Santos, O. (2012). Determinación del análisis bromatológico proximal y fotoquímico preliminar de los extractos acuosos y etanolicos de inflorescencia de calathea allouia (aubl.) lindl. (Chufle), frutos de bromelia karatas (piñuela) y flor de Cucurbita pepo l. (Flor de ayote). Universidad de El Salvador. Recuperado de: http://ri.ues.edu.sv/1929/1/FLOR__de_Cucurbita_pepo_L._%28FLOR_DE_AYOTE%29.pdf
- Corbo, M. R., Speranza, B., Campaniello, D., Amato, D. D., Sinigaglia, M. (2010). Fresh-cut fruits preservation : current status and emerging technologies. *Technology and Education Yopcs in Applied Microbiology and Microbial Miotrchnology*. 1143–1154.
- Córdova, J. (2012). Estudio de factibilidad para la producción, comercialización de pimienta negra. Recuperado de: <http://www.dspace.uce.edu.ec:8080/bitstream/25000/1128/1/T-UCE-0003-61.pdf>

- Cortés, G., Prieto, G., Rozo, W. (2015). Caracterización bromatológica y fisicoquímica de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) y su posible aplicación como alimento nutraceutico. *Revista Ciencia en Desarrollo*. 6(1), 89-97
- Espinosa, C., Valle, S., Ybarra, C., Martínez, T. (2014). Comportamiento poscosecha de frutos de aguacate 'Hass' afectado por temperatura y atmósfera modificada con microperforado. *Fitotec. Mex.* 37(3).
- Esquivel, L., Mechato, A., Simpalo, W., Simpalo, W. (2014). Efecto del cloruro de calcio en el procesamiento mínimo de papaya (*Carica papaya* L.) almacenada en refrigeración bajo atmosfera modificada, evaluado por el modelo D-Óptimo. *Rev. Ingeniería: Ciencia. Tecnología e Innovación*. 1(1).
- Fenglin, G., Lehe, Tan., Huasong, W., Yiming, F., Qinghuang, W. (2013). Analysis of the blackening of green pepper (*Piper nigrum* Linnaeus) berries. *Food Chemistry*. 138(2), 797-801.
- Flores, N. (2009). Evaluación de la calidad bioquímica de la pimienta gorda (*pimienta Dioca* L. *Merril*) deshidratada con ciclos de atemperado. Recuperado de: http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/7907/2407_tesis_Diciembre_2010_822804625.pdf?sequence=1
- Flores, D., y Ruiz, E. (2010). Influencia del tiempo de escaldado, presión de empacado al vacío y grado de madurez del grano en la conserva de arveja (*Pisum sativum* L.). Recuperado de: <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/667/4/03%20AGI%20269%20%20PRESENTACION%20TESIS.pdf>
- García, C., Molina, M. (2008). Estimación de la vida útil de una mayonesa mediante pruebas aceleradas. *Ingeniería*. 18(2), 57-64.

- García, Y., García, A., Hernández, A., y Pérez, J. (2011). Estudio de la variación del Índice de Color durante la conservación de la piña variedad Cayena Lisa a temperatura ambiente. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(4), 12-16.
- Garza, S. (2002). Caracterización reológica y microbiológica, y cinéticas de deterioro en cremogenado de melocotón. Recuperado de: <http://www.cervantesvirtual.com/nd/ark:/59851/bmcxg9k5>.
- Gonzales, D., Hernández, M., Herrera, A., Barrera, j., Martínez, O., Paez, D. (2001). Desarrollo del fruto e índices de cosecha de la Carambola (*Averrhoa Carambola* L.) producida en el piedemonte amazónico Colombiano. *Agronomía Colombiana*. 18(1-2), 7-13
- ICA. (2014). El cultivo de la pimienta se abre paso en el Valle del Guamuez. Recuperado de: [http://www.ica.gov.co/Noticias/Agricola/2013-\(1\)/El-cultivo-de-la-pimienta-se-abre-paso-en-el-Valle.aspx](http://www.ica.gov.co/Noticias/Agricola/2013-(1)/El-cultivo-de-la-pimienta-se-abre-paso-en-el-Valle.aspx).
- Iglesias, E. G., Cabezas, L. G., & Nuevo, J. L. F. (2006). Informe de vigilancia tecnológica. *Tecnología de envasado en atmosfera protectora*. 112-113.
- Izquierdo, D., Naranjo, C. (2006). Estandarización de las condiciones de proceso de zanahoria (*Daucus C.* y lechuga (*Lactuca sativa*) como productos mínimamente procesados refrigerados refrigerados (MPR) obtenidos apartir de cultivos convencionales y orgánicos en la empresa JC Asociados.
- Kader, A., y Pelayo, C. (2011). Tecnología postcosecha de cultivos hortofrutícolas, Información e Investigación en Tecnología Postcosecha. California, Estados Unidos.
- Kader, A., Zagory, D., Kerbel, E. L., & Wang, C. Y. (1989). Modified atmosphere packaging of fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*. 28(1), 1-30.

- Kader, A. (1992). Postharvest Biology and Technology: an overview. *Postharvest Technology of Horticultural crops. University of California. Division of Agriculture*. 2(1), 21-28
- Kandasamy, P., Moitra, R., Mukherjee, S. (2012) Diffusion channel system for enhancing the shelf life of fruits and vegetables under controlled, modified atmosphere. *International Journal of Bio-Resource and Stress Management*, 3(3), 394-403.
- Lanchero, O., Velandia, G., Fischer, G., Valera, N., Garcia, H. (2007). Comportamiento de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en poscosecha bajo condiciones de atmósfera modificada activa. *Corpoica -Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 8(1), 61-68
- Magaña, W., Balbín, M., Corrales, J., Rodríguez, A., Saucedo, C., Cañizares, E., y otros. (2004). Efecto de la frigoconservación en el comportamiento fisiológico de frutas de pitahaya (*Hylocereus undatus* Haworth). *Cultivos Tropicales*. 25(4), 33-39.
- Mendoza, A. (1994). Índices de Madurez y Conservación de Mango mediante el uso de atmósferas modificadas (*Mangifera indica* var. Tommy Atkins). Universidad de la Salle.
- Meneses, S., Valenzuela, J. (2008). La atmosfera modificada, una alternativa para la conservación de alimentos. *Lasallista de investigación*. 5(2), 112-123.
- Mónaco, E.; Chiesa, A.; Trincherro, G., Fraschina, A. (2005). Selección de películas poliméricas para su empleo con lechuga en atmósfera modificada. *RIA*. 34 (1), 59-70.
- Moncayo, D. (2013). Desarrollo de un recubrimiento comestible a partir de un biopolímero para prolongar la vida útil de frutas frescas. Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/44864/1/24336979.2013.pdf>
- Nasar, S. M., Plummer, J. a., Siddique, K. H. M., White, P. F., Harris, D., Dods, K. (2008). Nitrogen retards and oxygen accelerates colour darkening in faba bean (*Vicia faba* L.) during storage. *Postharvest Biology and Technology*. 47(1), 113–118.

- Nisha, P., Rekha, S., Aniruddha, B. (2009). The degradation kinetics of flavor in black pepper (*Piper nigrum* L.). *Journal of food Engineering*. 44-49.
- O'Hare, T. (1993). Postharvest Physiology and storage of carambola (starfruit): a review. *Postharvest Biology and Technology*. 2(4), 257-267.
- Ordoñez, M., Gely, M., Pagano, A. (2012). Estudio de las propiedades físicas y de la cinética de secado de granos de maíz colorado duro. *Avances en ciencia en ingeniería*. 3(3), 153-171.
- Ospina, D., Ciro, H., y Aristizábal, I. (2007). Determinación de la fuerza de la fractura superficial y fuerza de firmeza en frutos de lulo (*Solanum quitoense* x *Solanum hirtum*). *Rev.Fac.Nal.Agr*, 60(2), 4163-4178.
- Ospina, S., Cartagena, J. (2008). La atmósfera modificada: una alternativa para la conservación de los alimentos. *Revista Lasallista de Investigación*. 5(2), 112-123.
- Piergiovanni, L., y Limbo, S. (2010). Shelf life prodotto-dipendente. In Food packaging. *Materiali. Tecnologie e qualità alimenti*. 431-451
- Pintado, C. (2012). Utilización de atmósferas modificadas en el almacenamiento frigorífico de uva de mesa. Recuperado de: <https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/15687/1/Tese%20CristinaPintado.pdf>
- Prasad, S., Pendharkar, M., Banerjee, A., Bandoypadhyay, C. (2001). Blackening in green pepper berries. *Phytochemistry*. 27(3), 715-717.
- Ruiz, M., Zapata, J., Serrano, M., Valero, D., Martinez, D., Castillo, S., Guillen, F. (2014). Effect of oxalic acid on quality attributes of artichokes stored at ambient temperature. *Postharvest Biology and Technology*. 60-63.

- Sandhya, M. (2010). Modified atmosphere packaging of fresh produce: current status and future needs. *Food science and technology*. 43(3), 381-392.
- Sergio, L., Gatto, M. A., Spremulli, L., Pieralice, M., Linsalata, V. & Di Venere, D. (2016). Packing and storage conditions to extend the shelf life of semi-dried artichoke hearts. *FoodScience and Technology*. 277-284.
- Singh, K. K., & Goswami, T. K. (2000). Thermal properties of cumin seed. *Journal of Food Engineering*. 181–187.
- Umaña, E. (2010). Manual de conservación de alimentos por frio. *Ciencia y tecnología*. 44-45
- Valencia, F., Cortés, M., Roman, O. (2012). Cinética del color durante el almacenamiento de caramelos blandos de uchuva adicionados de calcio y sin sacarosa. *Revista Lasallista de investigación*. 9(2), 11-25.
- Valenzuela, J. Á. L., Juárez, F. J. V., Torres, S. L. M., Angulo, G. L., & García, M. O. V. (2011). Efecto del almacenamiento en atmósfera controlada sobre la calidad poscosecha y nutricional del tomate. *Chapingo Serie Horticultura*, 17(2), 115–128.
- Vega, A., Palacios, M., Boglio, F., Pássaro, C., Jeréz, C., Lemus, R. (2007). Deshidratación osmótica de la papaya chilena (*Vasconcellea pubescens*) e influencia de la temperatura y concentración de la solución sobre la cinética de transferencia de materia. *Ciencia y tecnología de alimentos*. 27(3), 17-22.
- Vignoni, L., Cesari, R., Forte, M., Mitabile, M. (2006). Determinación del índice de color en ajo picado. *Información Tecnológica*. 17(6), 63-67
- Wills R, Mc Glasson Mb, Graham L, Joyce D. (1999). Introducción a la fisiología y manipulación poscosecha de frutas, hortalizas y plantas ornamentales. Editorial Acribia. Zaragoza. España.

- Yalçın, İ., Özarslan, C., y Akbaş, T. (2007). Physical properties of pea (*Pisum sativum*) seed. *Journal of Food Engineering*, 79(2), 731-735.
- Yanucci, D. (2002). Factores que afectan la conservación en la conservación de Granos y Semillas Poscosecha. *Actualización Técnica*. 3(1), 10-54.
- Zapata, L., Malleret, A., Quinteros, C., Lesa, C., Vuarant, C., Rivadeneira, M. (2010). Estudios sobre cambios en la firmeza en bayas de arándanos durante su maduración. *Ciencias Exactas y Naturales. Scielo Argentina*. 159-171.

ANEXOS

Anexo 1. Valores Esfericidad.

	Valores (mm)					Promedio	Desviación estándar	coeficiente de variación
Largo (L)	5,4	5,37	5,42	5,38	5,41	5,40	0,02	0,34%
Ancho (W)	5,4	5,29	5,3	5,28	5,31	5,32	0,04	0,81%
Espesor (T)	5,31	5,26	5,3	5,29	5,32	5,30	0,02	0,39%

Anexo 2. Valores resultantes de esfericidad.

	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5	Φ Promedio	Desviación estándar	coeficiente de variación
Resultado	0,994	0,988	0,985	0,988	0,988	0,989	0,003	0,34%

Anexo 3. Valores Densidad aparente.

	Valores					Promedio	Desviación estándar	coeficiente de variación
Mrl	350g	345g	342g	348g	357g	348	5,68	1,63%
Mrv	230g	230g	230g	230g	230g	-	-	-
Vr	200mL	200mL	200mL	200mL	200mL	-	-	-

Mrl = Masa del recipiente lleno; Mrv = Masa del recipiente vacío; Vr = Volumen del recipiente

Anexo 4. Valores resultantes Densidad aparente.

	ρ_{b1}	ρ_{b2}	ρ_{b3}	ρ_{b4}	ρ_{b5}	ρ_b Promedio	Desviación estándar	coeficiente de variación
Resultado	0,60 g/mL	0,58 g/mL	0,56 g/mL	0,59 g/mL	0,64 g/mL	0,59 g/mL	0,03	4,80%

Anexo 5. Valores Peso de mil granos de pimienta.

	Valores (g)					Promedio	Desviación estándar	coeficiente de variación
Peso	12	11	15	11	13	12,4	1,67	13,49%

Anexo 6. Valores resultantes peso de mil granos de pimienta posterior a extrapolación.

	peso1	peso2	peso3	peso4	peso5	peso promedio	Desviación estándar	coeficiente de variación
Resultado	120g	110g	150g	110g	130g	124g	16,73	13,49%

Anexo 7. Análisis de varianza para firmeza en Pimienta verde (*Piper nigrum* L.).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS					
PRINCIPALES					
A:Temperatura	8,56821	2	4,2841	68,01	0,0000
B:Tipo de empaque	8,2789	3	2,75963	43,81	0,0000
INTERACCIONES					
AB	1,48261	6	0,247102	3,92	0,0029
RESIDUOS	3,0235	48	0,0629895		
TOTAL (CORREGIDO)	21,3532	59			

GL: Grados de Libertad. Fuente: esta investigación.

Anexo 8. Parámetros cinéticos y bondad de ajuste cinética de orden cero para Firmeza en pimienta verde (*Piper nigrum* L.).

Firmeza					
Envase	T (°C)	K (días⁻¹)	R²(%)	%E	RMSE
Polipropileno	4	1,399	97,47	2,43	1,03
	18	1,736	90,81	7,89	2,53
	30	2,090	93,99	7,99	2,42
Vacío	4	1,376	98,41	1,76	0,8
	18	1,526	90,15	5,63	2,31
	30	1,832	95,57	4	1,8
Sin envase	4	1,175	95,02	2,69	1,23
	18	1,902	95,15	5,48	1,96
	30	1,628	95,51	4,63	1,61
Nitrógeno	4	0,500	94,80	1,62	0,98
	18	0,914	92,82	1,17	0,63
	30	1,403	88,45	5,44	2,32

T: Temperatura, K: Constante Cinética, R²: Coeficiente de Determinación, E: Error Porcentual, RMSE: raíz cuadrada del error medio cuadrático. Fuente: Esta Investigación.

Anexo 9. Análisis de varianza pérdida de peso en Pimienta verde (*Piper nigrum* L.)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS					
PRINCIPALES					
A:Temperatura	1,98048	2	0,990242	280,80	0,0000
B:Tipo de empaque	3,88766	3	1,29589	367,47	0,0000
INTERACCIONES					
AB	0,172123	6	0,028671	8,13	0,0000
RESIDUOS	0,16927	48	0,00352646		
TOTAL (CORREGIDO)	6,20954	59			

GL: Grados de Libertad. Fuente: esta investigación.

Anexo 10. Parámetros cinéticos y bondad de ajuste cinética de orden cero para pérdida de peso en pimienta verde (*Piper nigrum* L.).

Pérdida de peso

Envase	T (°C)	K (días ⁻¹)	R ² (%)	%E	RMSE
Polipropileno	4	0,581	95,26	0,48	0,59
	18	0,744	98,45	0,39	0,42
	30	0,8201	98	0,47	0,53
Vacío	4	0,453	98,21	0,23	0,28
	18	0,6455	92,53	0,72	0,84
	30	0,7062	97,91	0,41	0,47
Sin envase	4	0,9535	92,42	1,16	1,25
	18	1,3067	97,18	0,94	1,01
	30	1,4319	97,18	1,09	1,11
Nitrógeno	4	0,418	91,01	0,53	0,60
	18	0,4982	93,7	0,50	0,59
	30	0,8005	95,54	0,73	0,79

T: Temperatura, K: Constante Cinética, R²: Coeficiente de Determinación, E: Error Porcentual, RMSE: raíz cuadrada del error medio cuadrático. Fuente: Esta Investigación.

Anexo 11. Análisis de varianza Humedad en Pimienta verde (*Piper nigrum* L.)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS					
PRINCIPALES					
A:Temperatura	0,00123759	2	0,000618796	357,24	0,0000
B:Tipo de empaque	0,000600142	3	0,000200047	115,49	0,0000
INTERACCIONES					
AB	0,0001857	6	0,0000302616	17,47	0,0000
RESIDUOS	0,00083144	48	0,00000173217		
TOTAL (CORREGIDO)	0,00210245	59			

GL: Grados de Libertad. Fuente: esta investigación.

Anexo 12. Parámetros cinéticos y bondad de ajuste cinética de orden uno para Humedad en pimienta verde (*Piper nigrum* L.).

Humedad					
Envase	T (°C)	K (días⁻¹)	R²(%)	%E	RMSE
Polipropileno	4	0,0066	98,63	0,074	0,003
	18	0,0102	98,18	0,135	0,006
	30	0,0147	93,7	0,34	0,017
Vacío	4	0,0029	94,59	0,068	0,003
	18	0,0066	94,33	0,165	0,007
	30	0,0074	91,79	0,219	0,010
Sin envase	4	0,0147	98,73	0,156	0,007
	18	0,0161	99,52	0,100	0,005
	30	0,0175	97,96	0,230	0,011
Nitrógeno	4	0,0036	98,27	0,041	0,002
	18	0,0047	98,83	0,046	0,002
	30	0,0075	95,87	0,143	0,007

T: Temperatura, K: Constante Cinética, R²: Coeficiente de Determinación, E: Error Porcentual, RMSE: raíz cuadrada del error medio cuadrático. Fuente: Esta Investigación.

Anexo 13. Análisis de varianza Color en Pimienta verde (*Piper nigrum* L.)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS					
PRINCIPALES					
A:Temperatura	17,2577	2	8,62884	209,85	0,0000
B:Tipo de empaque	6,1667	3	2,05557	49,99	0,0000
INTERACCIONES					
AB	4,97932	6	0,829887	20,18	0,0000
RESIDUOS	1,97371	48	0,041119		
TOTAL (CORREGIDO)	30,3774	59			

GL: Grados de Libertad. Fuente: esta investigación.

Anexo 14. Parámetros cinéticos y bondad de ajuste cinética de orden cero para Color en pimienta verde (*Piper nigrum* L.).

Color					
Envase	T (°C)	K (días¹)	R²(%)	%E	RMSE
Polipropileno	4	0,328	96,14	3,08	0,30
	18	0,7058	98,26	8,79	0,42
	30	1,9206	93,05	35,98	2,40
Vacío	4	0,3127	98,20	2,37	1,19
	18	0,4521	99,63	1,93	0,12
	30	1,9136	99,58	11,77	0,56
Sin envase	4	0,3735	93,51	5,99	0,45
	18	1,4808	91,13	30,81	2,11
	30	2,0001	97,47	14,83	1,47
Nitrógeno	4	0,2214	98,92	1,46	0,15
	18	0,3871	92,02	4,27	0,29
	30	0,5165	92,73	1,46	0,15

T: Temperatura, K: Constante Cinética, R²: Coeficiente de Determinación, E: Error Porcentual, RMSE: raíz cuadrada del error medio cuadrático. Fuente: Esta Investigación.

Anexo 15. Análisis características bromatológicas de pimienta verde (*Piper nigrum*

L.). Laboratorios Especializados Universidad de Nariño.

 Universidad de Nariño	SECCIÓN DE LABORATORIOS REPORTE DE RESULTADOS	Código: LBE-PRS-FR-76
		Página: 1 de 1
		Verión: 2
		Vigente a partir de: 2014-01-15

LABORATORIO		BROMATOLOGÍA - ABONOS ORGÁNICOS			
DATOS USUARIO		DATOS MUESTRA		REPORTE No. LB-R- 087-17	
Solicitante: Fernanda Stephany Enriquez Gómez. Proyecto: Investigación Evaluación del comportamiento postcosecha y estimación de vida útil de la pimienta (<i>Piper nigrum</i> L.) cultivada en el municipio de Villa Garzón Departamento de Putumayo.		Muestra Pimienta verde (<i>Piper nigrum</i> L.)		Código muestra 375	
Dirección: Mz 16 casa 6. B/ Tamasagra, Pasto		Procedencia Finca Propietario Rodrigo Trujillo Andrade, Villagarzón (F)			
cc / nit: 1085313552		Responsable del Muestreo *		Fernanda Stephany Enriquez Gómez	
Teléfono: 302 391 1700		Fecha de Muestreo *		AA 17	MM 09 DD 28
e-mail: stephanyeqz@gmail.com		Fecha Recepción Muestra en Laboratorio		AA 17	MM 09 DD 28
		Fecha de Emisión del Reporte		AA 17	MM 12 DD 20
FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO		2017-09-28 a 2017-12-18			
ANÁLISIS SOLICITADO		Proximal, Calcio, Hierro			
PARÁMETRO	MÉTODO	TÉCNICA	UNIDAD DE MEDIDA	Pimienta verde	
Humedad	Secado estufa	Gravimétrica	g/100g	72,00	
Materia seca	Secado estufa	Gravimétrica	g/100g	28,00	
Ceniza	Incineración mufla	Gravimétrica	g/100g	1,14	
Extracto etéreo	Extracción Soxhlet	Gravimétrica	g/100g	3,18	
Fibra cruda	Digestión ácida-básica. Bolsas Ankom	Gravimétrica	g/100g	4,49	
Proteína	Kjeldahl (N*6,25)	Titulométrica	g/100g	4,29	
Extracto No Nitrogenado	Cálculo matemático	Cálculo matemático	g/100g	14,89	
Calcio	Oxidación húmeda, EAA	Espectrofotometría A.A.	mg/100g	103	
Hierro	Oxidación húmeda, EAA	Espectrofotometría A.A.	mg/100g	1,08	
OBSERVACIONES					
Nota a		Información suministrada por el usuario			
Composición		Por cada 100 g de parte comestible			
RESULTADOS VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA MUESTRA ANALIZADA					
UNA VEZ ENTREGADO ESTE INFORME DE RESULTADOS, EL LABORATORIO DEJA DE TENER CONTROL SOBRE SU REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL.					

Original firmado

Gloria Sandoz Espinoza Naranjo

Téc. Laboratorio Bromatología - Abonos Orgánicos

Elaboración del Reporte

Aprobación del Reporte

Revisó: GREN

2017-12-20

FIN REPORTE DE RESULTADOS